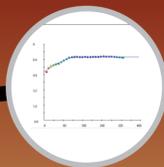


Geoestatística aplicada na Agricultura de Precisão utilizando o Vesper

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



Embrapa

*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

Exemplares desta obra podem ser adquiridos na:

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, nº 1.024, Bairro Jardim Botânico,
CEP: 22460-000, Rio de Janeiro, RJ - Fone: (21) 2179-4500 / Fax: (21) 2274-5291
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Unidade responsável pelo conteúdo e pela edição

Embrapa Solos

Comitê Local de Publicações

Presidente

José Carlos Polidoro

Secretário-executivo

Jacqueline Silva Rezende Mattos

Membros

Ademar Barros da Silva

Adriana Vieira de Camargo de Moraes

Alba Leonor da Silva Martins

Enyomara Lourenço Silva

Evaldo de Paiva Lima

Joyce Maria Guimarães Monteiro

Luciana Sampaio de Araujo

Maria Regina Capdeville Laforet

Maurício Rizzato Coelho

Moema de Almeida Batista

Supervisão Editorial

Jacqueline Silva Rezende Mattos

Revisão de texto

André Luiz da Silva Lopes

Normalização bibliográfica

Luciana Sampaio de Araujo

Projeto gráfico

Triunfal Gráfica & Editora - Assis-SP

Capa

Ronaldo Pereira de Oliveira

Editoração eletrônica

Triunfal Gráfica & Editora - Assis-SP

Ilustrações de capa

Foto: *Gustavo Vasques*

Figuras: *Ronaldo Pereira de Oliveira*

Tratamento das ilustrações

Triunfal Gráfica & Editora - Assis-SP

1ª edição

1ª impressão (2015): 1.000 exemplares

Publicação digitalizada (2015)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Solos

Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o Vesper /
Ronaldo Pereira de Oliveira, Célia Regina Grego, Ziany Neiva
Brandão, editores técnicos. – Brasília, DF : Embrapa, 2015.
PDF (159 p.) : il. color. ; 16 cm x 23 cm.

ISBN 978-85-7035-572-0

1. Agricultura de precisão. 2. Método estatístico. 3. Programa de
computador. I. Oliveira, Ronaldo Pereira de. II. Grego, Célia Regina. III.
Brandão, Ziany Neiva. IV. Embrapa Solos.

CDD (23.ed.) 631.4

Autores

Célia Regina Grego

Possui graduação em Engenharia Agrônômica (1996) pela Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP). Concluiu Mestrado (1999) e doutorado (2002) em Agronomia, área de Energia na Agricultura, Departamento de Engenharia Agrícola, pela Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu (UNESP). Realizou Pós-doutorado no Instituto Agrônômico de Campinas (2006) na área de análise geoestatística aplicada a solos. Desde 2006, é pesquisadora na Embrapa Monitoramento por Satélite em Campinas - SP, atuando principalmente nos seguintes temas de pesquisa e desenvolvimento: agricultura de precisão, meio ambiente, indicadores agroambientais e variabilidade espacial com aplicação da geoestatística para agropecuária.

Ronaldo Pereira de Oliveira

Possui graduação em: Engenharia Eletrônica (Universidade Gama Filho, 1989) e Ciência da Computação (Montgomery College, 1986); mestrado em Geoinformação para Aplicações Rurais (ITC/Universidade de Wageningen, 1996); e doutorado em Agricultura de Precisão (Universidade de Sydney, 2010). Experiência com computação gráfica na arquitetura e prospecção de petróleo. Desde 1990, vinculado ao Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Embrapa Solos), atuando na área de pesquisa e desenvolvendo na formulação, execução e coordenação de projetos em: geotecnologias aplicadas ao mapeamento temático; sistemas de geoinformação e suporte à decisão; mapeamento digital de solos; geoestatística; e agricultura de precisão.

Agradecimentos

Aos companheiros da equipe técnica envolvida no Macroprograma 1 em Agricultura de Precisão, na voluntariosa troca de informações e dados, além de toda a articulação junto ao Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA) na pessoa da Dra. Ziany Brandão.

Ao MAPA, por priorizar ações de coordenação, acompanhamento, promoção e fomento de tecnologias agropecuárias no setor de Agricultura de Precisão. Pelo apoio financeiro e aporte institucional deste ministério federal, sem os quais esta publicação não seria possível. À direção e equipe do Departamento de Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Rural, em particular ao Dr. Fabrício Vieira Juntolli, por todo o esforço na captação e liberação dos recursos.

À toda a equipe da Rede de Pesquisa em Agricultura de Precisão, em especial aos líderes, Dr. Ricardo Inamassu e Dr. Alberto de Campos Bernardi, que tanto deram apoio logístico, institucional e financeiro na execução das atividades de campo e na realização de curso de aperfeiçoamento e nivelamento da equipe técnica. Aos pesquisadores que motivaram a aplicação do curso para estudos do fluxo de sedimentos da Bacia Amazônica, na Embrapa Macapá, dissertações em agroecologia, na Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), e no aperfeiçoamento de técnicos agrícolas, no SENAR.

Ao proprietário da Fazenda Cruzeiro, Dr. Vinícius de M. Benites, por acreditar e persistir nos investimentos em tecnologia e no entendimento das oportunidades de aplicação da Agricultura de Precisão, além da plena disponibilização dos dados para fins de publicação.

Aos membros da equipe do Laboratório de Agricultura de Precisão (PAL) da Universidade de Sydney, por terem me propiciado a experiência funcional e social de trabalhar e conviver num ambiente capaz de integrar alta eficiência e ética científica com descontração e respeito às individualidades. Ao Dr. Alex McBratney, pela inspiração científica e artística, capaz de promover o conteúdo técnico deste livro e inspirar a capa dentro dos padrões visuais do antigo ACPA. Aos companheiros de equipe, Brett Whelan, Budiman Minasny, James Taylor, Rafael Viscarra, Tom Bishop, Craig Stuart e Damien Field.

Prefácio

Este livro é resultado do esforço de um grupo de atores comprometidos com “um novo olhar” na adoção da “Agricultura de Precisão”. Grupo que busca gerar conhecimento e inovação tecnológica em prol da eficiência, competitividade e sustentabilidade do campo. Olhar de fomento técnico e indutivo, de difusão ampla e acessível, onde o planejamento da lavoura siga com parcimônia conceitos, métodos, protocolos operacionais e tecnologias que se adequem, eficiente e dinamicamente, às condições específicas das diferentes culturas. Grupo que envolve a Embrapa, a *Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão* (CBAP), universidades, cooperativas e provedores de tecnologia num esforço compartilhado e complementar. Olhar que monitora tendências da realidade que se impõem cada vez mais rápida e desafiadora, onde a adoção da agricultura de precisão torna-se um fator de desenvolvimento eficiente e sustentável do agronegócio brasileiro, indo além do questionamento científico.

A obra sistematiza parte do conteúdo programático do nivelamento em geotecnologias aplicadas às ações de pesquisa da Rede de Agricultura de Precisão liderada pela Embrapa. Detalhado nos oito capítulos aqui apresentados, o módulo intitulado “Curso Básico de Geoestatística Utilizando o VESPER” abordou técnicas de análise da variabilidade espacial dos fatores de produção para culturas anuais e perenes. No contexto de software livre, este aplicativo foi considerado uma opção eficiente, acessível e facilitadora no aprendizado dos conceitos da dependência espacial e da interpolação por krigagem. O Vesper (**V**ariogram **E**stimation and **S**patial **P**rediction plus **E**Rror) é um software de origem acadêmica, implementado pela Universidade de Sydney, Austrália, e disponível como ferramenta shareware aplicada à agricultura de precisão. Visa atender a demanda de agilizar a geração de mapas em face ao volume de dados gerados pelo monitoramento intensivo da lavoura. O material compilado também se mostrou pertinente sendo aplicado em estudos de fluxos de sedimentos e agroecologia, além de servir de apoio no aperfeiçoamento de técnicos do SENAR.

A abordagem pragmática da interface do Vesper reflete-se na formatação do livro, o qual entendemos ser de valor introdutório e

didático no uso das técnicas de geoestatística em fases iniciais de adoção da agricultura de precisão. Na primeira seção, são apresentados conceitos básicos, buscando simplificar o entendimento da teoria por trás dos procedimentos automatizados. A segunda seção centra-se na apresentação da interface do Vesper, onde o livro toma a forma de uma transcrição do manual original em inglês. A terceira e última seção, descreve o roteiro de importação dos mapas gerados no Vesper em um Sistema de Informações Geográficas, além de identificar as funções dos procedimentos descritos dentro do processo de adoção da agricultura de precisão e do manejo da fertilidade do solo por sítio específico no cultivo de grãos em área de plantio direto no Cerrado.

Daniel Vidal Pérez
Chefe-Geral da Embrapa Solos

Sumário

Seção 1 - Antes do Vesper

Introdução 13

Organização do livro 14

Convenções Tipográficas..... 16

Capítulo 1 - Adoção da Agricultura de Precisão 19

1.1 A Geoestatística como Parte do Processo Decisório 19

1.2 Tecnologias de Monitoramento Intensivo..... 23

Capítulo 2 - Pré-processamento dos Dados..... 29

2.1 Análise Exploratória..... 29

2.2 Localização das Observações 29

2.3 Estatística Descritiva..... 32

2.4 Geração do Histograma 37

2.5 Dados Georreferenciados..... 39

Capítulo 3 - Conceitos Básicos da Geoestatística..... 41

3.1 Origem e Conceitos 41

3.2 Análise do Variograma 44

3.3 Exemplo de Ajuste Manual 49

3.4 Características da Dependência Espacial 52

3.5 Interpolação por Krigagem 57

3.6 Tipos de Krigagem 58

Seção 2 - Utilizando o Vesper

Capítulo 4 - O Vesper 65

4.1 Requisições do Sistema..... 65

4.2 Apresentação da Interface 68

4.3 Gerenciamento de Arquivos 73

4.4 Exportação de Resultados..... 79

4.5 Aplicações Avançadas..... 81

Capítulo 5 - Variografia..... 83

5.1 Opções de Ajuste do Variograma 83

5.2 Modelos Teóricos e Técnicas de Ajuste 89

5.3 Avaliação da Qualidade do Ajuste..... 91

Capítulo 6 - Predição Espacial.....	93
6.1 Krigagem no Vesper.....	93
6.2 Definição dos Parâmetros de Krigagem.....	94
6.3 Geração da Grade e do Contorno de Interpolação.....	95
6.4 Krigagem por Ponto e por Bloco.....	98
6.5 Parâmetros de Vizinhaça.....	99
6.6 Parâmetros Alternativos.....	99
6.7 Execução da Krigagem.....	100
Seção 3 - Depois do Vesper	
Capítulo 7 - Importação de Mapas em SIG.....	105
7.1 Mapas Georreferenciados.....	105
7.2 Conversão em ASCII Raster Grid.....	106
7.3 O QGIS.....	107
7.4 Importação de ArcView ASCII Raster Grid.....	108
7.5 Importação de Texto Delimitado.....	114
Capítulo 8 - Exemplos das Aplicações na AP.....	125
8.1 As Funções da Geoestatística na Adoção da AP.....	125
8.2 Monitoramento Intensivo na Produção de Grãos.....	126
8.3 Dependência Espacial da Fertilidade do Solo.....	128
8.4 Mapas Estimados por Krigagem.....	131
8.5 Monitoramento da Condutividade Elétrica.....	134
8.6 Estimativas com Diferentes Densidades Amostrais.....	136
8.7 Modelos Parametrizados na Variografia.....	141
Conclusão.....	145
Referências Bibliográficas.....	147
Anexo I - Formulário de Registro.....	153
Anexo II - Arquivo de Controle.....	155
Anexo III - Fórmulas Utilizadas nos Cálculos do Vesper.....	157

Seção 1

Antes do Vesper

Introdução

Este livro tem a proposta prática de apresentar uma ferramenta de apoio à decisão e simulação geoestatística. O objetivo principal é disponibilizar um material de referência básica e acessível, que possa orientar na execução dos procedimentos fundamentais da geoestatística. A proposta é apresentar de forma simplificada os conceitos e requisitos necessários nas etapas de análise variográfica e geração de mapas temáticos. Visa facilitar a execução do fluxo de processos para a obtenção de parâmetros da dependência espacial de uma dada variável e a sua predição em locais onde esta não foi observada.

O material é resultado da compilação, ajuste e detalhamento do conteúdo da apostila do curso de nivelamento em geotecnologias realizado no âmbito da Rede de Pesquisa em Agricultura de Precisão¹ (Rede AP). Participaram cerca de 35 pesquisadores na figura de multiplicadores para uma rede envolvendo mais de duzentos pesquisadores, um laboratório de referência nacional e quinze campos experimentais em diferentes regiões agrônômicas e culturas (i.e.: anuais e perenes). Esta demanda por um nivelamento técnico, de um grupo especializado e multidisciplinar, enfatizou processos de análise de dados georreferenciados, posteriores ao monitoramento intensivo. Priorizou-se o uso de ferramentas livres em temas como: pré-processamento de dados observados no monitoramento intensivo; geoestatística; e análise espacial. Em relação ao módulo de geoestatística, buscou-se facilitar o aprendizado de conceitos e o entendimento das aplicações em Agricultura de Precisão (AP) utilizando a interface do Vesper (MINASNY et al., 2005).

Considerado como uma ferramenta de referência da rede de pesquisa, o Vesper (*Variogram Estimation and Spatial Prediction plus Error*) além de eficiente no processamento e moldada para dados gerados no monitoramento intensivo, oferece uma interface simplificada para ajuste manual ou automático de semivariogramas que pode facilitar a maturação de conceitos no estudo da autocorrelação espacial. Foi desenvolvido no Laboratório de Agricultura de Precisão da Universidade de Sydney para a estimativa de variogramas e predição

1 <http://www.macroprograma1.cnptia.embrapa.br/redeap2/Rede%20AP>

espacial por krigagem com indicação do erro associado. O aplicativo é uma solução acadêmica robusta, acessível e livre para investigação científica. Foi implementado visando atender a demanda por softwares capazes de agilizar o processamento do grande volume de dados gerados no monitoramento intensivo. Muito frequentemente, acervos com densidades amostrais maiores que 100 pontos por hectare para cada variável observada. Automaticamente calcula distâncias máximas e intervalos entre pares, além de ajustar alguns dos modelos teóricos disponíveis, calculando métricas da qualidade do ajuste e permitindo o posterior refinamento visual do mesmo.

Esta abordagem pragmática do software reflete-se na formatação deste livro, que tem uma abordagem operacional em sua apresentação, em parte, servindo de manual de uso do Vesper e dos procedimentos de importação dos mapas interpolados em Sistemas Geográficos de Informação (SIG). O material não se propõe a ser completo ou extensivo, não considerando o detalhamento de conceitos probabilísticos, hipóteses, ou formulações matemáticas. Portanto, a consulta de publicações de referência da base teórica é indicada (CÂMARA; MEDEIROS, 1996; CRESSIE, 1991; GOOVAERTS, 1997; ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; JOURNAL, 1989; SOARES, 2006; WEBSTER; OLIVER, 2007; YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Organização do livro

Como reflexo de um treinamento prático, o livro segue a sequência lógica de procedimentos para geração de mapas por métodos da geoestatística. Ilustra o passo a passo das seguintes etapas: a) análise exploratória, caracterização da variabilidade e estimativa da dependência espacial de dados do monitoramento intensivo em planilha eletrônica; b) uso das interfaces do Vesper para análise e ajuste do variograma, interpolação por Krigagem e exportação de resultados; e c) importação dos mapas interpolados em SIG (i.e.: QGIS). Essas são etapas intermediárias entre os processos de monitoramento intensivo e análise espacial multivariada.

A primeira seção do livro, “Antes do Vesper”, apresenta uma introdução sintética da geoestatística em três (3) capítulos. No primeiro é feita uma breve introdução da aplicação da geoestatística e suas poten-

ciais contribuições no panorama atual da AP, considerando o ferramental tecnológico para o monitoramento intensivo do campo. Esses equipamentos são capazes de gerar dados georreferenciados em alta densidade amostral, dando mais robustez aos resultados estatísticos e possibilitando uma automação nos procedimentos da análise variográfica.

O segundo capítulo apresenta procedimentos inerentes a uma fase preliminar de análise estatística de suma importância, denominada “Análise Exploratória”. Nesta, avaliam-se e validam-se os dados de entrada segundo as mesmas condições de distribuição normal exigidas pelo formalismo probabilístico considerado na estatística clássica. A execução típica da análise de distribuição e a geração do histograma desta distribuição são exemplificadas em funções de uma planilha eletrônica (i.e.: Microsoft Excel 2013), no intuito de orientar o passo a passo desta etapa numa ferramenta mais acessível, que pode ser replicada em diferentes softwares livres compatíveis. O terceiro e último capítulo desta primeira seção segue a lógica de fazer uma breve apresentação de referência das etapas da geoestatística, sem os detalhes matemáticos e seus algoritmos, visando desmistificar a complexidade da teoria envolvida. Introduce os conceitos básicos da geoestatística, demonstrando como proceder o ajuste de um semivariograma numa planilha eletrônica, etapa da variografia; e apresentando os métodos mais utilizados de interpolação por Krigagem, etapa da estimativa espacial.

Na segunda seção, “Utilizando o Vesper”, três (3) capítulos apresentam e detalham as funções e particularidades de uso dos botões de controle e das três (3) abas da janela principal do aplicativo. O Vesper possibilita estimar o variograma de uma variável, e, posteriormente, calcular num local não observado o valor desta variável com o erro associado na predição. O quarto capítulo apresenta as funções dos botões de controle e da aba de entrada, onde são detalhados: os formatos de entrada e de saída de dados, o acesso e a estrutura do arquivo de controle, e as condições de registro e uso do software. O quinto e sexto capítulos descrevem, respectivamente, as abas de variograma (i.e.: “**Variogram**”) e krigagem (i.e.: “**Kriging**”) que, como na maioria dos aplicativos de geoestatística, segmentam a predição espacial em duas etapas distintas. Primeiro a etapa de variografia, onde o cálculo do variograma empírico e o ajuste do variograma teórico são realizados, seguida pela etapa de interpolação por krigagem.

A terceira e última seção do livro, “Após o Vesper”, apresenta no sétimo capítulo a importação dos arquivos gerados no Vesper em ambiente SIG, viabilizando procedimentos posteriores de análise espacial. Os conceitos cartográficos e topológicos das estruturas de dados vetoriais e matriciais, apesar de básicos para uso do SIG e complementares para fins de uma análise espacial avançada, não são apresentados por serem considerados fora do escopo das técnicas de geoestatística. O oitavo e último capítulo do livro, faz uma breve apresentação das aplicações das técnicas de variografia e Krigagem com dados reais de uma área comercial de produção de grãos em região de Cerrado, com extensão de 33 ha, sob sistema de plantio direto com a rotação das culturas de soja, milho e sorgo. Os resultados ilustram a influência de dados gerados em diferentes densidades amostrais na precisão dos mapas interpolados e na capacidade de desenvolver análises quantitativas mais avançadas com os parâmetros da variografia. As diferentes densidades consideram a amostragem da fertilidade do solo em malha regular de uma amostra por hectare (i.e.: 35 observações) e o monitoramento intensivo (i.e.: 7.480 observações) da Condutividade Elétrica Aparente do Solo (CE_a).

Espera-se sistematizar e ampliar o acesso a mapas estimados com alta precisão, onde os erros das estimativas são conhecidos, ou seja, mapa do desvio padrão na regressão não linear, bem como suas resoluções espaciais possam refinar ou homogeneizar as distintas densidades amostrais associadas. No caso da AP, estas técnicas podem ser ajustadas a uma ampla gama de aplicações em apoio à adoção da AP, viabilizando a integração de dados que, em geral, variam quanto à distribuição espacial, incerteza na determinação, densidade amostral, estrutura e natureza da variabilidade dos atributos.

Convenções Tipográficas

Como reflexo de um treinamento prático, o livro assume o formato de um manual que segue as seguintes convenções tipográficas:

“Ferramentas de Análise”

Referência direta aos elementos de software (e.g.: aba, janela, sub-janela, opções de menu e botões de comando) exatamente como definidos nas interfaces em português.

<i>“Run Kriging Program”</i>	Referência direta aos elementos de software (e.g.: aba, janela, sub-janela, opções de menu, botões de comando e nomes ou extensão de arquivos) exatamente como definidos nas interfaces em inglês.
“Zonas de Manejo”	Destaque para termos técnicos, de referência textual ou jargões do segmento específico em português.
<i>“on the go”</i>	Destaque para termos técnicos ou jargões do segmento específico em inglês.

Capítulo 1

Adoção da Agricultura de Precisão

Ronaldo Pereira de Oliveira

Célia Regina Grego

1.1 A Geoestatística como Parte do Processo Decisório

A Agricultura de Precisão (AP) é uma realidade que vem se difundindo progressivamente no agronegócio brasileiro. A AP utiliza a integração de tecnologias de monitoramento intensivo com técnicas de análise espacial visando o planejamento estratégico do manejo dos fatores de produção segundo suas variações espaço-temporais. Numa visão geral, a AP consiste em um processo cíclico de etapas bem definidas, as quais requisitam uma integração multidisciplinar e abrangente de conceitos, tecnologias e conhecimentos. Este processo é composto por objetivos específicos como: viabilizar a robótica embarcada; desenvolver métodos para integração e análise de dados heterogêneos; implementar sistemas de análise espacial; e propor protocolos operacionais e recomendações agronômicas para o manejo por sítio-específico. A integração destas tecnologias busca disponibilizar aplicativos de apoio à decisão, acessíveis e eficientes, de forma a maximizar os benefícios econômicos, ambientais e sociais do manejo diferenciado (MCCOWN et al., 2006).

Em meio a uma grande variedade de tecnologias e serviços disponíveis no mercado, pode-se considerar que a adoção da AP envolve a identificação das ferramentas mais eficientes e dos métodos adequados para cada sistema de produção específico. Estas tecnologias visam facilitar e ampliar a capacidade de entender e avaliar as potencialidades do manejo diferenciado dos fatores preponderantes nas variações da produtividade (e.g.: recursos naturais, aplicação de insumos, sistemas integrados e fatores mercadológicos). Esta customização da

tecnologia busca, cada vez mais, a utilização de equipamentos que permitam a caracterização e o manejo da variabilidade espacial da lavoura com precisão agrônômica (BERNARDI et al., 2014).

A necessidade de caracterizar a autocorrelação espacial de muitas variáveis e de mapear a estrutura espacial de suas variações relaciona a geoestatística diretamente aos processos de adoção da AP, onde deve prevalecer a visão central de planejamento da lavoura. Seja o monitoramento intensivo feito de forma analógica ou semiautomática em pequenas propriedades (e.g.: cultivos maçã, uva de mesa, pêssego e vitinicultura – potencialmente até 10 ha), ou automatizado pela mecatrônica embarcada e tecnologias do monitoramento proximal em áreas extensas com produção intensiva (e.g.: grãos, algodão e cana-de-açúcar - potencialmente acima de 20 ha). Um fator inerente aos dados da AP que contempla a requisição básica da geoestatística está no registro das coordenadas individuais de cada observação. Estes dados georreferenciados podem ser obtidos por sistemas de navegação global por satélites (e.g.: GPS), mapas temáticos, imagens de satélite ou fotos aéreas cartograficamente registradas.

Na continuidade do processo cíclico de adoção da AP, torna-se primordial integrar, sintetizar e traduzir a massiva quantidade de dados monitorados em informações relevantes que promovam avanços no conhecimento agrônômico, operacional e gerencial no manejo diferenciado do sistema de produção. Nesta etapa do processo as técnicas geoestatísticas muito contribuem no apoio à decisão, quantificando as dimensões em que ocorrem variações de uma variável (i.e.: escala da correlação espacial entre valores), e mapeando a estrutura espacial destas variações (i.e.: geometria da dispersão dos valores). Os parâmetros descritos na geoestatística fornecem meios para uma postura gerencial consciente, em que o planejamento agrônômico e operacional considera o manejo por sítio-específico. Complementares à mecatrônica embarcada, ferramentas de software que viabilizam o uso destas técnicas facilitam um melhor entendimento da variação espacial da produção. Diante da realidade onde a adoção da AP envolve casos individualizados nas variações em quantidade, densidade, qualidade e incerteza dos dados monitorados, torna-se essencial o uso de aplicativos que possibilitem o acesso e a customização dos processos de predição espacial de forma específica para cada acervo de dados.

A adoção de novas tecnologias desenvolvidas para o monitoramento intensivo do campo busca correlacionar os dados mais facilmente observados com outras propriedades de difícil obtenção, visando à redução de gastos e aumento de produtividade. Isto envolve a adoção de plataformas multissensor que permitam quantificar, com alta precisão espacial, os fatores preponderantes da produção (WHELAN, 1998). Segundo Molin (2012), a prática adequada da AP impõe aceitar o fato e assumir o desafio de que manejar a variação espacial da produtividade vai muito além do que mapear um atributo de solo e intervir em taxas variadas de N, P, K, Ca e Mg. Ou seja, podem existir muitos outros fatores potencialmente influenciando na variabilidade espacial-temporal da produção.

Apesar dos procedimentos da análise geoestatística não diferirem conceitualmente para aplicações de diversos fins, na AP a disponibilidade de dados em alta resolução espacial viabiliza não só uma maior precisão e robustez nos resultados, como também facilita o entendimento integrado das correlações espaço-temporais entre os diferentes fatores de produção. Assim, a análise quantitativa da dependência espacial de dados gerados no monitoramento intensivo dos solos, dos parâmetros de plantas e da produtividade, pode ser facilitada pela geoestatística, bem como pode facilitar o uso desta importante ferramenta na análise da estrutura espacial das variações. Segundo Grego e Vieira (2005), mesmo numa parcela experimental de 30 x 30 m existe grande variabilidade de propriedades físicas do solo e se for considerada como homogênea pode mascarar os resultados dos tratamentos aplicados no manejo por sítio-específico.

A geoestatística difere da estatística clássica por considerar que os valores de uma variável estão diretamente relacionados à sua localização. Em síntese, espera-se que observações próximas apresentem leituras mais semelhantes do que aquelas separadas por distâncias maiores. Através de suas técnicas, a geoestatística possibilita avaliar a dependência espacial das variáveis e estimar valores para locais não medidos. Isto é feito em duas etapas utilizando-se o mesmo conjunto de dados observados, primeiramente para quantificar a autocorrelação espacial entre pares de valores equidistantes em diferentes distâncias, e depois, utilizando estes parâmetros para estimar o valor da variável em locais não amostrados, segundo valores conhecidos numa dada

vizinhança. Desta maneira, estas técnicas possibilitam produzir informações para gerar mapas e para planejar a estrutura e o esquema amostral de uma variável em função da sua variabilidade espacial.

Em resumo, as técnicas geoestatísticas podem ser usadas para diferentes etapas, específicas e complementares. Estas incluem: a) descrever e modelizar quantitativamente os padrões espaciais da variação espacial (i.e.: modelagem do variograma); b) predizer valores em locais não amostrados (i.e.: interpolação por krigagem); c) dimensionar a incerteza associada a uma estimativa em locais não amostrados (i.e.: variância da krigagem); e d) auxiliar no planejamento e otimização de esquemas amostrais.

Segundo Lima (2006), as vantagens reconhecidas da geoestatística sobre outras técnicas convencionais de predição espacial são:

- O estudo da variabilidade espacial de uma variável regionalizada;
- A suavização na estimação de valores preditos na regressão;
- O desagrupamento que anula as concentrações localizadas das observações;
- A determinação do comportamento da variação em diferentes direções (anisotropia);
- A precisão sobre as áreas ou pontos, não observados, a serem estimados; e
- O dimensionamento das incertezas associadas a estimativa.

O fato de considerar a dependência espacial das variáveis e buscar descrever quantitativamente a estrutura espacial de suas variações representa um grande potencial de aplicação nas áreas de geociências, ciências ambientais e agronômicas. Em AP, a possibilidade de gerar mapas relacionados à produtividade agrícola utilizando a geoestatística, constitui um avanço no manejo localizado dos sistemas de produção agrícolas e uma maior precisão e eficiência na tomada de decisão segundo Tisseyre e McBratney (2007). Com isso, a geoestatística constitui uma peça fundamental na investigação científica e na geração de tecnologias, produtos e processos que venham estimular a adoção consciente e ponderada da AP.

1.2 Tecnologias de Monitoramento Intensivo

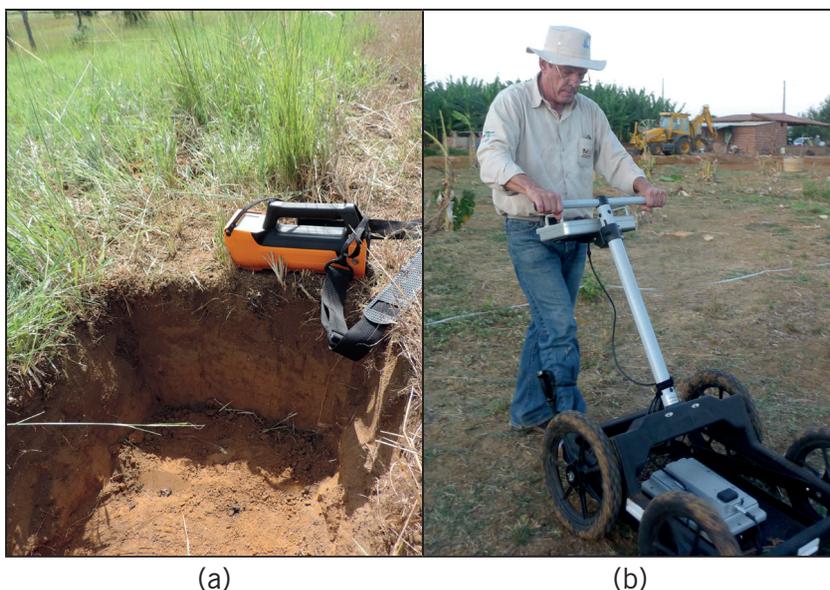
Recursos avançados da eletrônica, robótica embarcada e tecnologia da informação estão cada vez mais presentes no campo através da AP (CÂMARA; MEDEIROS, 1998; MOLIN, 1997; VIEIRA, 2000). Exemplos do uso destas tecnologias aplicadas se caracterizam em funções específicas nas intervenções do monitoramento intensivo, em geral de modo contínuo e não invasivo, sendo: a auto navegação, os sensores de produtividade, os sensores óticos (i.e.: visível e infravermelho próximo) e os sensores de atributos de solo. Estes compõem o conjunto de ferramentas facilitadoras e geradoras de densos acervos de dados, paradigma referido na literatura internacional como a tecnologia de sensores “*on the go*”. Com a utilização destes sensores é possível gerar informações em tempo real, de forma complementar as tecnologias de campo que visam a automação da aplicação de insumos por taxas variadas.

O grande número de observações realizadas no monitoramento contínuo com sensores de produtividade, condutividade elétrica, emissões gama e outros atributos de solo possibilita gera volumosos bancos de dados espaço-temporais de um único talhão. Muito frequentemente, com densidades amostrais maiores que 100 pontos por hectare em cada variável observada. Nas etapas posteriores ao monitoramento, dentro do processo de adoção da AP, ferramentas de software tornam-se necessárias para gerenciar, analisar e espacializar os dados observados. Estas tecnologias complementares atendem aos processos de decisão do manejo diferenciado, onde a crítica, a integração e a interpretação das informações dependem de métodos e procedimentos analíticos como: filtragem de valores discrepantes em arquivos gerados pela tecnologia de campo (i.e.: dados brutos em arquivos de formatos proprietários gerados pelas diferentes tecnologias) e a geração de mapas. Nestas, incluem-se os aplicativos ilustrados neste livro como o Vesper para geoestatística e o sistema de informação geográfica QGIS.

Amplamente difundido em suas diversas aplicações, o sensoria-mento remoto vem sendo complementado por novas tecnologias de sensores proximais, os quais também geraram acervos de dados com alta resolução espacial. Estes realizam medições por contato direto com o solo (RABELLO et al., 2008) e a planta, ou em distancias de

até 3 metros em relação ao terreno, dependendo do tipo de sensor. A frequência de leitura é sincronizada com a atualização de coordenadas dos sensores de posicionamento (i.e.: um ponto por segundo), variando o número total de observações por área em função da velocidade de operação. Uma síntese dos tipos de sensores mais utilizados e as diferentes tecnologias disponíveis no mercado inclui:

- Sensores de Posicionamento de Campo - permitem determinar a localização precisa dentro do talhão e a altimetria, possibilitando a modelagem topográfica (e.g.: declividade, aspecto, área de contribuição e índice de encharcamento). São sensores de navegação global por satélites (BERALDO; SOARES, 1995), denominados de *Global Navigation Satellite System* (i.e.: GNSS) e disponíveis em diferentes escalas de precisão (e.g.: GPS, DGPS e RTK);
- Sensores de Produtividade - permitem quantificar parâmetros da produção em função da área colhida (e.g. massa, umidade, conteúdo de açúcar, óleo e proteínas). Existem vários aspectos de operação, arquitetura e precisão no desenvolvimento desses sensores (MOLIN, 2000). Atualmente os sensores de produtividade, dependendo da cultura à qual se destina, são desenvolvidos usando sistemas com transdutores piezoelétricos para pressão, sistemas ópticos, mecânicos ou que usam sensores de fluxo por infravermelho localizados no tubo pneumático ou placa de impacto instalada no elevador da colheitadeira (REYNS et al., 2002); e
- Sensores Proximais de Solo - permitem quantificar atributos do solo por medição direta (e.g.: condutividade elétrica do solo) ou indireta (e.g.: atributos correlacionados por funções de pedotransferência). Outras medidas diretas valoram atributos como: conteúdo de matéria orgânica, pH, capacidade de troca catiônica, textura, umidade, nutrientes e contaminações por metais pesados. Incluem diferentes tipos de tecnologias em sensores proximais para observação de diferentes atributos de solo (Tabela 1.1), sendo: espectrômetros de campo (i.e.: visível e infravermelho), condutívimetros por indução elétrica e eletromagnética, espectrômetros de Raios X, penetrógrafos digitais, gamarradiômetros (e.g.: RS-230 BGO da Radiation Solution - Figura 1.1.a) e radares de penetração por permitividade elétrica (e.g.: Ground Explorer HDR da Mala Geoscience - Figura 1.1.b)



Fotos: Gustavo Vasques.

Figura 1.1. Sensores proximais para o monitoramento intensivo e não invasivo de atributos do solo em AP: a) Gamaradiômetro (RS-230 BGO); b) Radar de Penetração (Ground Explorer).

No monitoramento intensivo de atributos de solo, estas tecnologias visam auxiliar nas questões de custo/benefício da laboriosa malha amostral de fertilidade do solo diante do número mínimo de observações requisitadas pelos métodos da geoestatística. Pois um grande número de pontos inviabiliza o custo da operação (BOLFE; GOMES, 2005). Em contrapartida, as observações devem ser suficientemente próximas e bem distribuídas para conseguir caracterizar as possíveis escalas de variabilidade do atributo monitorado. Assim como as imagens de satélite ou fotografias aéreas estão para a localização do perfil modal no mapeamento de solos clássico, os mapas produzidos pelos sensores de solo podem ajudar na determinação de um número adequado de amostras (VIEIRA et al., 2008), identificando regiões com diferentes respostas e, a partir desta informação, concentrando-se a amostragem nas regiões onde existir maior variabilidade e diminuindo-se a densidade nos locais mais uniformes (GREGO et al., 2014).

Nesse contexto, a alta densidade amostral obtida pelos sensores de atributos de solos traz duas vantagens distintas. A primeira, tam-

bém comum a outros parâmetros da produção, está na robustez estatística que se obtém com o grande número de observações, facilitando e possibilitando a automação na geração de mapas de atributos interpolados por Krigagem. A segunda, sendo esta específica nas questões de grade amostral, é buscar na integração das variabilidades expressas pelos diferentes sensores os meios para delinear áreas homogêneas do solo, comumente denominadas na AP de “Zonas de Manejo” (“*Management Zones*” - MZs), a partir das quais o esquema amostral pode ser planejado segundo a estrutura de variação das MZs, reduzindo ou otimizando o número de observações em relação às práticas de grade amostral de solos.

O conhecimento sobre os atributos de solos caracterizados pelas diferentes tecnologias de sensores proximais (Tabela 1.1) não é recente (ADAMCHUK et al., 2004) e as abordagens para o delineamento das MZs variam segundo o tipo de manejo do solo ou da produção que se pretende implementar. É nesta fase de integração da informação que as etapas de variografia e de predição espacial por Krigagem permitem quantificar e representar cartograficamente as variações dos parâmetros que potencialmente influenciam nas variações da produtividade, permitindo gerar mapas de atributos em alta resolução sobre uma grade de predição comum.

Outras classificações para um arsenal mais abrangente de sensores são apresentadas por Gebbers (2014), categorizando os equipamentos segundo estratégias de monitoramento como: princípio de medição (e.g.: mecânicos, químicos, eletromagnéticos, óticos, radioativos, acústicos e pneumáticos); plataforma de operação (e.g.: orbitais, suborbitais, proximais por contato ou indução, drones e smartphones); modo de operação (e.g.: contínua, pontual e estacionário); e parâmetros de aplicação (e.g.: atributos do solo, produtividade, estágio de desenvolvimento, pragas, deficiência de nutrientes, estresse hídrico e identificação de plantas invasoras). Para um maior aprofundamento e atualização sobre os tipos de sensores e suas aplicações específicas, Gebbers (2014) apresenta uma generosa lista de referências bibliográficas e links atualizados.

Em boa parte ainda incipientes, a integração destas tecnologias oferece uma nova perspectiva com plataformas multissensores para o monitoramento intensivo dos fatores de produção. Entretanto, no

atual estágio de desenvolvimento, esta visão integrada depende das técnicas da geoestatística para viabilizar uma análise multivariada que considere as características das distintas distribuições espaciais e suas incertezas amostrais.

Tabela 1.1. Diferentes tipos de tecnologias em sensores proximais e suas aplicações típicas no monitoramento de atributos de solo.

Tipo de Sensor	Atributos do Solo								
	Textura	Matéria Orgânica e Carbono Total	Umidade	Salinidade e Sodicidade	Compactação	Profundidade	pH	Nitratos e Nitrogênio	CTC
Elétrico e Eletromagnético	X	X	X	X		X		X	X
Ótico e Rediométrico	X	X	X				X	X	X
Mecânico					X	X			
Acústico e Pneumático	X				X	X			
Eletroquímico				X			X	X	

Fonte: adaptado de Adamchuk et al. (2004).

Capítulo 2

Pré-processamento dos Dados

Célia Regina Grego

Ronaldo Pereira de Oliveira

2.1 Análise Exploratória

Como nas técnicas estatísticas, a geoestatística baseia-se em um conceito probabilístico. Por tanto, para o uso apropriado da geoestatística é necessário um embasamento teórico prévio sobre os fundamentos estatísticos, possibilitando assim que se faça uma análise estatística elementar das variáveis quantitativas a serem submetidas à análise variográfica e interpolação. Uma análise de consistência sobre os resultados da estatística descritiva é fundamental para avaliar se as condições exigidas pelo formalismo matemático e algoritmos da geoestatística são satisfeitas pelos dados de entrada. Estes procedimentos básicos indicam medidas que sintetizam a informação quantitativa contida no acervo de dados brutos, permitindo identificar dados discrepantes (i.e.: “*outliers*”) e possíveis modelos a serem utilizados numa inferência estatística. As medidas resumo caracterizam a tendência central e a dispersão numérica dos valores observados (e.g.: máximo, mínimo, média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação) e fazem parte do conjunto de funções básicas disponíveis numa planilha eletrônica, como demonstrado neste capítulo. Segundo Grego et al. (2014), a etapa preliminar de análise exploratória dos dados é de suma importância e tem o objetivo de identificar previamente a normalidade de distribuição de frequência das medidas e a variação nos dados.

2.2 Localização das Observações

O objetivo deste procedimento é ter os dados plotados numa representação gráfica segundo suas coordenadas X e Y (i.e.: coordena-

nadas retangulares em metros) para a certificação de que os pontos observados foram registrados corretamente. O exemplo no Excel utiliza os pares de coordenadas dos pontos registrados pelo GNSS, numa operação em modo contínuo das medidas de CE_p na profundidade de 0 a 30 cm. Isto permite verificar se a distribuição espacial dos pontos observados, base de toda a análise espacial, está coerente com a sua ocorrência dentro da área monitorada. O arquivo texto a ser verificado é o mesmo arquivo no formato de entrada aceito pelo Vesper, ou seja, nos formatos texto simples (“.txt”) ou delimitado por vírgulas (“.csv”).

Conforme ilustrado na Figura 2.1.a, seleciona-se as colunas com as coordenadas X e Y, nessa ordem. Na guia principal **“INSE-RIR”** da faixa de opções, clicar na seta do ícone **“Inserir Gráfico de Dispersão (X, Y) ou de Bolha”** para ver os diferentes tipos de gráficos disponíveis do grupo de comandos **“Gráficos”**. Selecionar a opção **“Dispersão”** (Figura 2.1.b). Alternativamente, o mesmo resultado pode ser obtido ao se clicar na seta **“Ver todos os Gráficos”** do grupo de comandos **“Gráficos”** (Figura 2.1.c). Na janela **“Inserir Gráfico”**, selecionar a aba **“Todos os Gráficos”**, selecionar o ícone **“Dispersão”**, nas opções de comando do menu **“XY (Dispersão)”**, e confirmar **“OK”** (Figura 2.1.c).

O resultado é um gráfico que simula um mapa onde todos os pontos do arquivo de entrada são plotados em relação às coordenadas retangulares em metros (Figura 2.2). Esta visualização gráfica simula um mapa dos pontos observados, sem ser fiel às proporções geométricas da projeção cartográfica considerada. Entretanto, a figura plotada nos permite validar a coerência dos dados de entrada em relação ao posicionamento cartográfico das coordenadas retangulares em metros, onde, pontos que venham ocorrer fora da área de estudo poderão ser desconsiderados, evitando distorções durante os subsequentes procedimentos de interpolação.

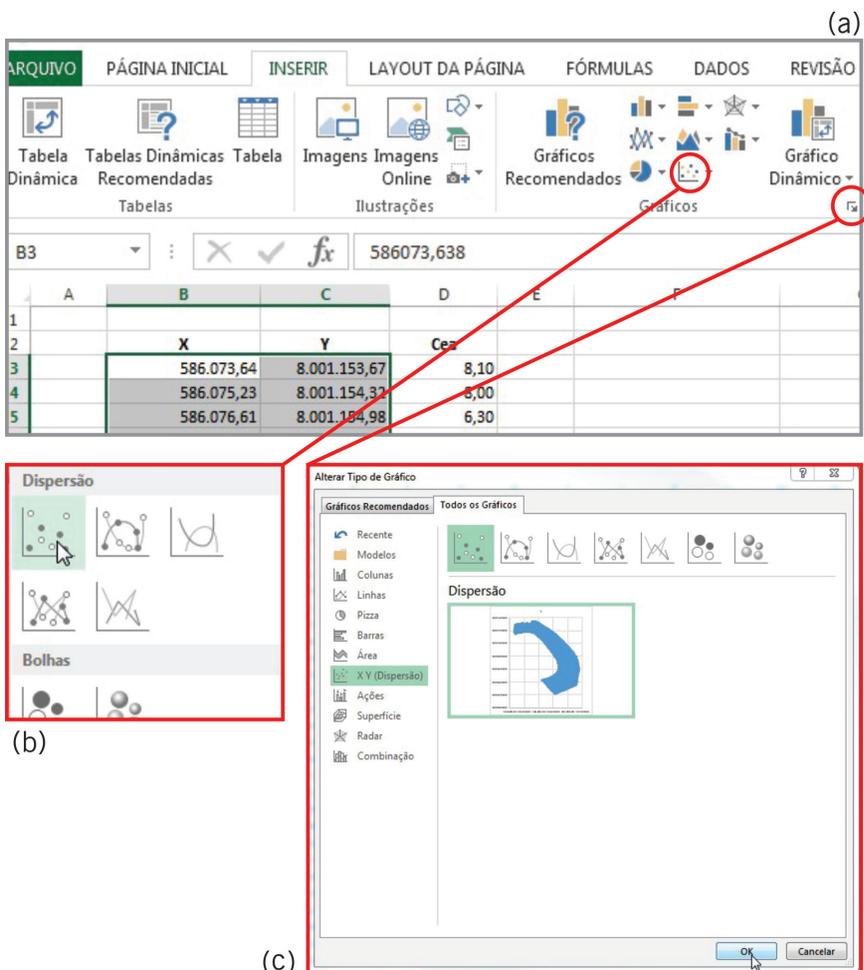


Figura 2.1. Opções de interface (em b e c) disponíveis na caixa de opções “Gráficos”, na aba “INSERIR” (em a), para gerar o gráfico de dispersão com a localização das observações em coordenadas retangulares.

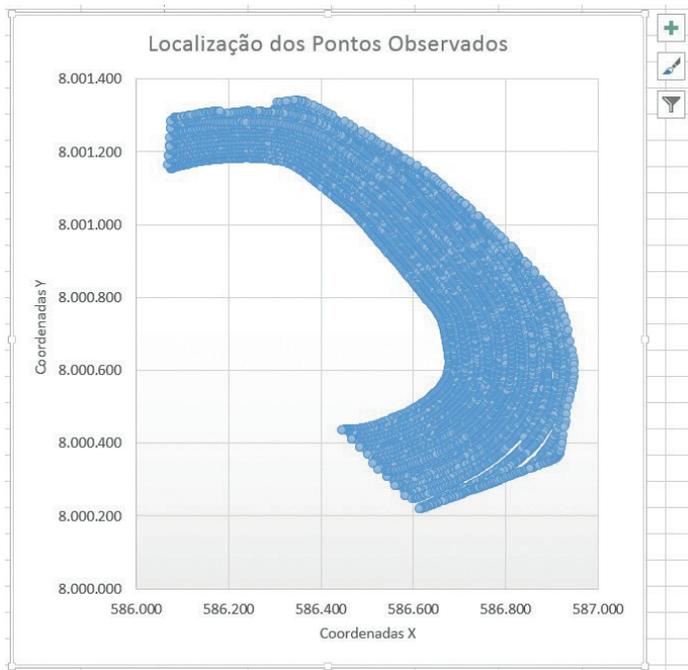


Figura 2.2. Resultado do gráfico de dispersão ilustrando a localização dos pontos observados em coordenadas retangulares.

2.3 Estatística Descritiva

A análise exploratória dos valores absolutos tem o objetivo de identificar os dados discrepantes, a normalidade de distribuição de frequência e a variação nos dados.

Para viabilizar os procedimentos da estatística descritiva dos dados da variável CE_a no Excel, primeiro é necessário ativar as funções das ferramentas de análise de dados, que a princípio deve aparecer no grupo Suplementos de Aplicativos Inativos. Os seguintes passos permitirão habilitar o suplemento **“Ferramentas de Análise”**:

1. Na aba **“Arquivo”**, selecionar: **“Opções”** que irá abrir a janela: **“Opções do Excel”** (Figura 2.3);
2. Nesta janela clicar na opção **“Suplementos”**, que permitirá visualizar as opções de gerenciamento das funções suplementares do Excel nesta aba;

3. Ainda na aba **Suplementos**, selecionar “**Suplementos do Excel**” na barra de rolagem da opção “**Gerenciar**” e clicar no botão “**IR**” para abrir a sub-janela “**Suplementos**”;
4. Das opções listadas em “**Suplementos Disponíveis**” na sub-janela “**Suplementos**” (Figura 2.4) e selecionar “**Ferramentas de Análise**” e clicar “**OK**”.

Após estes passos, o suplemento “**Ferramentas de Análise**” estará habilitado e deverá aparecer no grupo “**Suplementos de Aplicativos Ativos**” na aba “**Suplementos**” na janela “**Opções do Excel**”, condição que pode ser confirmada repetindo-se os passos 1 e 2 acima (Figura 2.5).

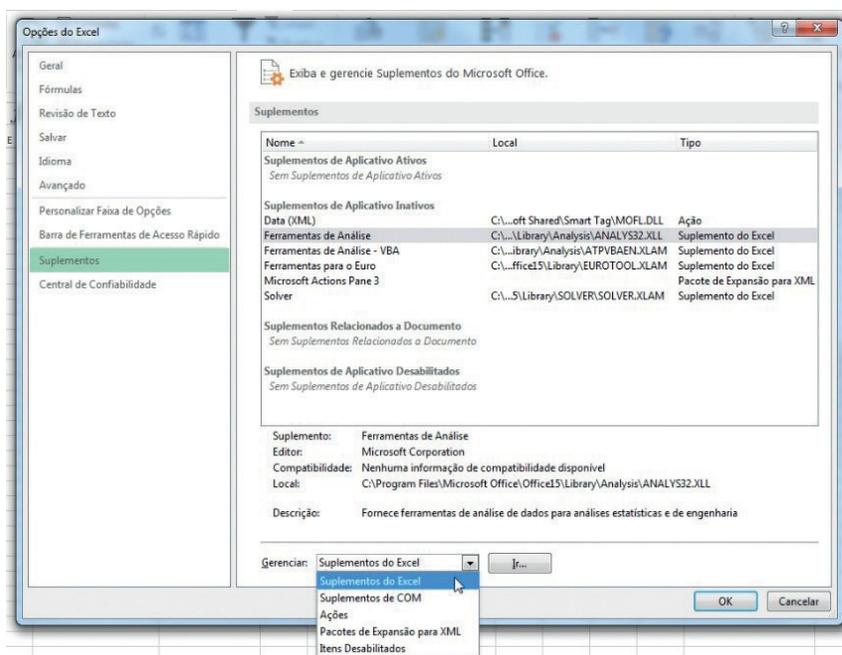


Figura 2.3. Ativação de “**Suplementos do Excel**” na janela “**Opções do Excel**” para habilitar as funções de estatística descritiva dos dados.

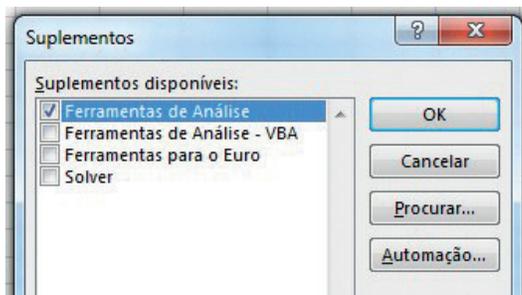


Figura 2.4. Sub-janela de “**Suplementos Disponíveis**” para ativar a opção de “**Ferramentas de Análise**” que habilitam as funções da estatística descritiva dos dados.

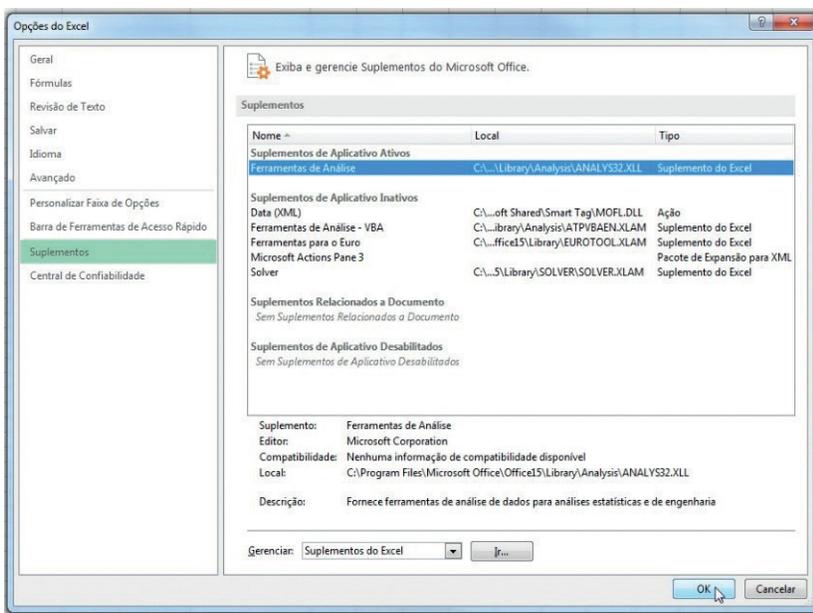


Figura 2.5. Consulta na aba “**Suplementos**” para confirmar a ativação das funções de “**Ferramentas de Análise**” listada em “**Suplementos de Aplicativos Ativos**”.

Uma vez ativado, o suplemento de análise de dados aparecerá na caixa de opções “**Análise**” da guia principal “**Dados**”. Para proceder a análise da distribuição da variável CE_a , os seguintes passos são necessários:

1. Na guia **“Dados”**, clicar na opção **“Análise de Dados”** da caixa **“Análise”** para abrir a sub-janela **“Análise de Dados”** (Figura 2.6);
2. Na barra de rolagem de **“Ferramentas de Análise”** da sub-janela **“Análise de Dados”**, selecionar a opção **“Estatística Descritiva”** e clicar em **“OK”**;
3. No campo **“Intervalo de Entrada”**, das opções de **“Entrada”**, na sub-janela **“Estatística Descritiva”**, selecionar para o cálculo a coluna, ou intervalo de células, contendo os dados da variável analisada, neste caso CE_a (Figura 2.7);
4. No campo **“Intervalo de Saída”**, das opções de **“Opções de Saída”**, na sub-janela **“Estatística Descritiva”**, selecionar o local para saída dos resultados;
5. Ainda em **“Opções de Saída”**, clicar em **“Resumo Estatístico”** e depois em **“OK”**.

Os parâmetros calculados são: média, mediana, moda, desvio padrão, variância, curtose, assimetria, valor mínimo, valor máximo e a contagem de pontos. O coeficiente de variação (CV) pode ser adicionado a este resumo de informações, sendo calculado pela Equação 1.

$$CV (\%) = \left(\frac{\text{Desvio Padrão}}{\text{Média}} \right) * 100 \quad (1)$$

Os coeficientes de assimetria e curtose expressam a normalidade de frequência dos dados e valores próximos de zero indicam distribuição de frequência normal nos dados (WEBSTER; OLIVER, 2007). A distribuição de frequência dos dados pode ser visualizada por meio do histograma que indica se uma distribuição aproxima-se de uma função normal ou não.

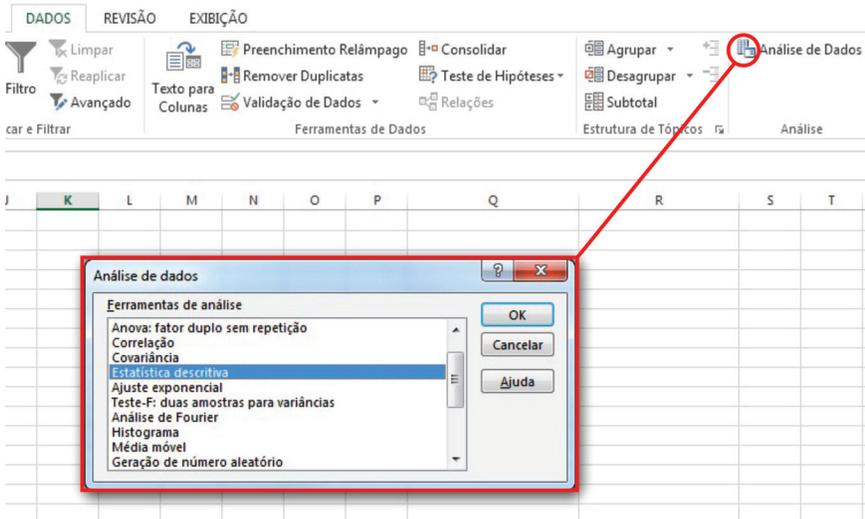


Figura 2.6. Seleção da função “Estatística Descritiva” na sub-janela de “Análise de Dados” ativada na caixa de opções “Análise” da guia principal “Dados”.

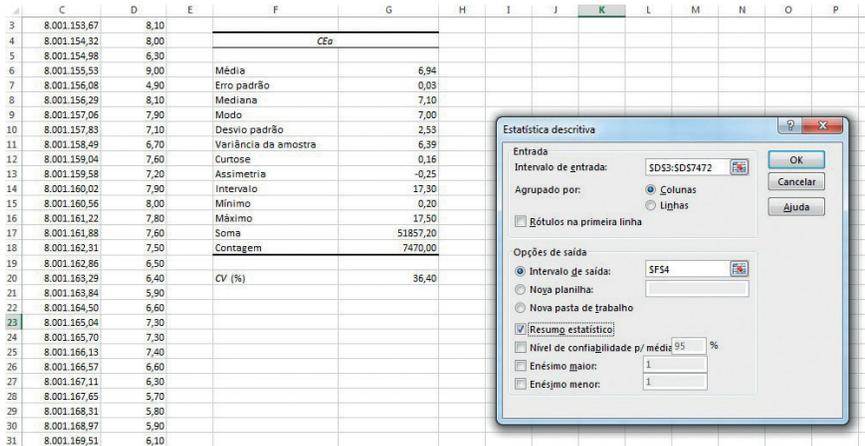


Figura 2.7. Seleção de opções de entrada e saída para o cálculo do resumo descritivo na sub-janela de “Estatística Descritiva”.

2.4 Geração do Histograma

O histograma é uma representação gráfica da distribuição de frequências das medições, em que o eixo das abcissas (X) corresponde ao intervalo de classe e o eixo das ordenadas (Y) à respectiva frequência.

A seguir, apresentamos um roteiro para construção do histograma no aplicativo Excel:

1. Após calcular a estatística descritiva, na guia **“Dados”**, clicar na opção **“Análise de Dados”** da caixa **“Análise”** para abrir a sub-janela **“Análise de Dados”**;
2. Na barra de rolagem de **“Ferramentas de Análise”** da sub-janela **“Análise de Dados”**, selecionar a opção **“Histograma”** e clicar em **“OK”** (Figura 2.8);
3. Com a sub-janela **“Histograma”** aberta, observar nos resultados da estatística descritiva, como os valores máximos e mínimos (Figura 2.9);
4. Criar um espaço de células e estabelecer um intervalo constante de blocos, entre o valor máximo e mínimo. No exemplo da Figura 2.9, sendo: mínimo = 0,2 e máximo = 17,5 com um intervalo de blocos variando de 2,88;
5. No campo **“Intervalo de Entrada”**, das opções de **“Entrada”**, na sub-janela **“Histograma”**, selecionar para o cálculo a coluna, ou intervalo de células, contendo os dados da variável analisada, neste caso CE_a (Figura 2.9);
6. No campo **“Intervalo do Bloco”**, das opções de **“Entrada”**, na sub-janela **“Histograma”**, selecionar para o cálculo as células contendo o intervalo de blocos (Figura 2.9) definido no passo quatro (4);
7. No campo **“Intervalo de Saída”**, das **“Opções de Saída”**, na sub-janela **“Histograma”**, indicar o local na planilha para saída dos resultados; e
8. Selecionar a opção **“Resultado no Gráfico”**, das **“Opções de Saída”**, na sub-janela **“Histograma”** e clicar em **“OK”**.

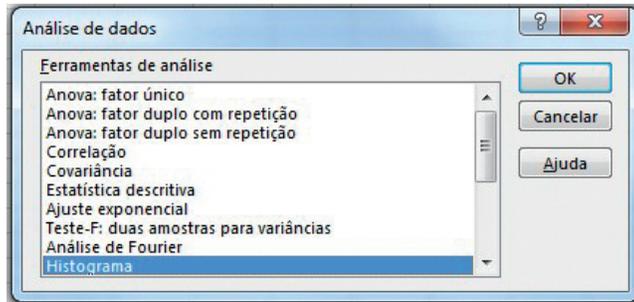


Figura 2.8. Seleção da função “Histograma” entre as opções de “Ferramentas de Análise” na sub-janela de “Análise de Dados”.

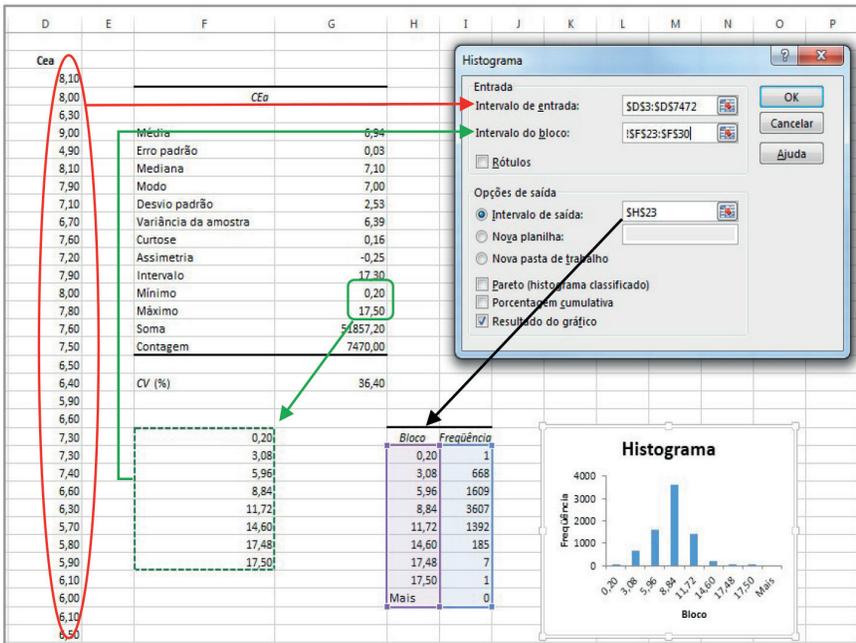


Figura 2.9. Seleção de células de “Entrada” na sub-janela de “Histograma”, para o “Intervalo de bloco” e o “Intervalo de entrada” com valores da CE_a , e de células de “Saída” para o “Intervalo de saída” com o cálculo das frequências e a construção do histograma.

2.5 Dados Georreferenciados

Os acervos de dados georreferenciados podem ser visualizados, classificados e analisados conforme sua localização espacial e os valores dos pontos de vizinhança. Para tanto é necessário utilizar um SIG para a visualização dos dados de entrada em concordância com o sistema de coordenadas cartográficas nos quais eles foram gerados ou projetados. Neste manual optamos por utilizar como ferramenta de SIG o software QGIS, o qual é apresentado em mais detalhe no sétimo capítulo. O QGIS é um SIG livre e amigável, derivado de um projeto oficial da Open Source Geospatial Foundation (OSGeo).

A visualização espacial dos dados de entrada permite obter uma primeira impressão da distribuição no espaço e identificar possíveis concentrações de valores extremos em determinado local da área de estudo. Este é um fator importante a ser considerado na análise estatística, meramente numérica, de dados discrepantes. Pois no caso de dados georreferenciados, valores extremos ou desagrupados, que fiquem fora do intervalo interquartil, podem não significar uma ocorrência errônea, sendo o seu valor aparentemente discrepante uma medida real e correta justificada pelas características da sua localização. Casos bastante comuns no monitoramento intensivo da lavoura por efeitos de borda do tráfego operacional, sombreamento de plantas, infiltrações ou concentrações localizadas de insumos e corretivos.

A precisão cartográfica só pode ser observada depois dos dados terem sido importados em um ambiente SIG. O qual apresenta funções para definição de sistemas de coordenadas e transformações entre projeções cartográficas. A informação é apresentada numa escala cartográfica e pode gerar mapas com diferentes legendas de classificação. Como ilustrado na Figura 2.10, a visualização dos dados de entrada por intermédio do gráfico de dispersão, como apresentado no início deste capítulo (i.e.: Item 2.2), é apenas uma representação de referência e serve para uma crítica espacial preliminar quanto à localização dos pontos observados, uma vez contendo distorções geométricas em sua representação. O que difere da visualização cartograficamente precisa em ambiente SIG.

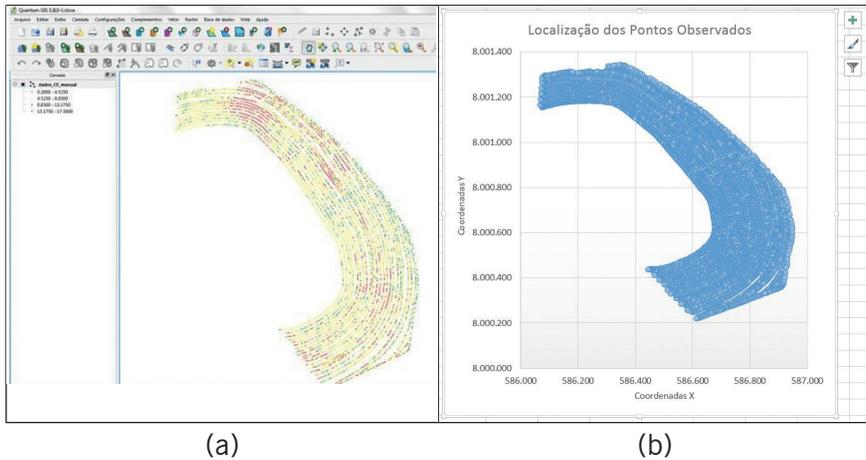


Figura 2.10. Diferenças na visualização espacial dos pontos georreferenciados em dois ambientes de software: a) mapa de pontos com precisão cartográfica em SIG; e b) representação dos pontos num gráfico de dispersão plotado em planilha eletrônica.

Capítulo 3

Conceitos Básicos da Geoestatística

Célia Regina Grego

Ronaldo Pereira de Oliveira

3.1 Origem e Conceitos

Os primeiros relatos do uso da geoestatística datam de 1911, com W.B. Mercer e A. D. Hall que examinaram a variação da produção de culturas no espaço de pequenos lotes. Mas somente na década de 60 a geoestatística foi consolidada. Na área de mineração, em 1951, Daniel G. Krige, engenheiro de minas de ouro na África do Sul, observou ganhos na precisão das estimativas com dados de concentração do mineral quando considerou as amostras vizinhas (KRIGE, 1951). Desta forma, a autocorrelação espacial tornou-se prática nas minas de ouro, considerando que para encontrar sentido nas variações das concentrações de ouro, era preciso levar em conta as distâncias entre as amostras. Na evolução das técnicas, em 1963, Matheron, um matemático da escola francesa, teve a mesma preocupação de melhorar as estimativas de ocorrência de minérios a partir de dados autocorrelacionados, derivando posteriormente soluções para o problema de estimativa a partir da teoria das variáveis regionalizadas (MATHERON, 1965; MATHERON, 1971). Conjunto de técnicas este que caracteriza um ramo específico da estatística espacial, denominado de geoestatística (WEBSTER; OLIVER, 2007).

A geoestatística parte do princípio que quanto mais próximas as amostras, mais parecidas entre si elas se apresentaram. Segundo Soares (2006), abrange um conjunto de métodos, técnicas e instrumentos estatísticos que caracterizam os fenômenos espaciais naturais e tem

por objetivo a caracterização da dispersão espacial e espaço-temporal das grandezas que definem a quantidade e a qualidade de recursos naturais e outros fenômenos em que os atributos manifestem certa estrutura no espaço e ou no tempo. Neste contexto, destaca-se o método de interpolação por krigagem, no qual se pode estimar o valor de uma dada propriedade para um local onde não foi medida.

Com este método, pode-se estimar o valor de uma dada propriedade em local não observado, utilizando uma função de correlação espacial entre os dados, sem viés e com variância mínima (VIEIRA, 2000). A interpolação por krigagem, ou simplesmente krigagem, cujo nome foi dado em homenagem a Daniel G. Krige, consiste em ponderar os vizinhos mais próximos do ponto a ser estimado, obedecendo os critérios de não tendenciosidade, que significa que em média a diferença entre valores estimados e observados para o mesmo ponto dever ser nula e ter mínima variância, ou seja, que os estimadores possuam a menor variância dentre todos os estimadores não tendenciosos.

Fazendo uma comparação entre a estatística clássica e a geoestatística, podemos dizer necessita da normalidade e independência espacial entre os dados enquanto que a geoestatística requer a correlação e dependência espacial. A estatística clássica assume que os pontos de observação são independentes, o que, na maioria dos casos, não acontece nos estudos envolvendo as ciências da terra (SRIVASTAVA, 1996).

A intensificação do uso da geoestatística deveu-se ao fato de assumir-se que a distribuição espacial de pontos de observação apresenta correlação, ou seja, que exista dependência espacial. Esta presuposição não é verdadeira quando se assume que os pontos de observação são independentes, o que, na maioria dos casos, não acontece nos estudos envolvendo as ciências da terra (SRIVASTAVA, 1996; WEBSTER, 1985). Srivastava (1996) comenta que a geoestatística incorpora, além da análise da distribuição estatística dos dados coletados, também as relações espaciais entre estes, na forma de correlação entre os pontos amostrados, pois de acordo com Trangmar et al. (1985), amostras mais próximas, dentro de uma mesma mancha de solo, são mais parecidas do que as mais distantes. Por essas diferenças, segundo Goovaerts (1997), os problemas da ciência da terra são efetivamente analisados atualmente por técnicas da geoestatística,

quando a interpretação da distribuição espacial dos dados tem forte impacto sobre os resultados e sobre a tomada de decisão.

Com a análise geoestatística é possível extrair e organizar os dados disponíveis numa relação espacial dos mesmos de acordo com a semelhança entre vizinhos georreferenciados. Suas técnicas são bastante consolidadas em estudos de solos, caracterizando a dependência espacial de diversos atributos físicos e químicos (ORTIZ, 2002; VIEIRA et al., 1981; WALTER et al., 2001) independentemente do tamanho da área amostrada (GOOVAERTS, 1997; GREGO; VIEIRA, 2005; WARRICK; NIELSEN, 1980). Estas análises apresentam um potencial de aplicação em diversas outras questões envolvendo ciências da terra e do ambiente (SOARES, 2006). Portanto, segundo Molin (2012), traz grande contribuição para a AP, principalmente na definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. Desta forma, a AP que propõe o manejo aplicado de acordo com a variabilidade local, seja com foco na produtividade da cultura ou da fertilidade do solo, pode em muito se beneficiar destas técnicas para obter vantagens econômicas e ambientais na sua aplicação.

A geoestatística é um modelo probabilístico que baseia-se na aleatoriedade dos dados para avaliar a correlação espacial; entre o valor de uma variável em local conhecido e o valor da mesma variável localizada em sua vizinhança (HUIJBREGTS, 1975). Na análise da autocorrelação espacial, a variável que apresenta um certo grau de correlação na distribuição espacial de seus valores pode ser considerada regionalizada (LIMA, 2006). Característica esta comum a diversas variáveis do meio físico. Este comportamento dos dados está fundamentado em modelos probabilísticos que definem a chamada teoria das variáveis regionalizadas (MATHERON, 1965; STURARO, 1994).

A função aleatória é considerada estacionária quando se assume que o seu valor médio esperado é constante em qualquer direção (STURARO, 1994). A hipótese de estacionaridade considera que a variável deve ser estatisticamente homogênea e isotrópica, permitindo que se façam inferências estatísticas (VIEIRA et al., 1983). Como na prática esta hipótese básica é difícil de ser verificada, trabalha-se alternativamente com as hipóteses de segunda ordem e a hipótese intrínseca conforme apresentadas em Pannatier (1996) e Vieira et al. (1983).

Os métodos são geralmente divididos em duas etapas metodológicas: a Análise Variográfica e Modelos de Estimção. A análise variográfica está estruturada no conceito de variáveis regionalizadas. Uma variável regionalizada é uma variável distribuída no espaço (ou no tempo) cujos valores são considerados como realizações de uma função aleatória (i.e.: processo aleatório, campo aleatório ou processo estocástico), no sentido de que os valores das medições feitas podem variar consideravelmente entre si dentro de uma dada distância. Entretanto, espera-se que, pares de pontos separados por distâncias menores do que uma determinada amplitude variográfica sejam espacialmente correlacionadas (i.e.: tenham valores mais próximos). Por outro lado, pares mais distantes do que esta amplitude não apresentam uma dependência espacial (LIMA, 2006).

Após a análise variográfica e verificada a possibilidade de estimção por técnicas geoestatísticas, pode-se proceder a uma estimção de valores em locais não amostrados. Constitui-se essa, numa tarefa importantíssima dos estudos ambientais, principalmente no que diz respeito a espacialização e representação cartográfica de diversos fenômenos de interesse. A krigagem constitui-se em um método de estimção por médias móveis e tem como característica particular, que o diferencia e o torna superior aos demais métodos de estimção, o fato de permitir o cálculo do erro associado às estimativas, chamado de variância de estimção.

3.2 Análise do Variograma

O variograma é a representação gráfica da dependência espacial obtido pela variância versus a distância. Segundo Vieira et al. (2008), é a grandeza mais aproximada para decidir se a dependência espacial existe ou não. Se a dependência espacial existir, haverá um crescimento na semivariância até uma determinada distância, a partir da qual o variograma se estabiliza. Caso contrário, se o variograma não apresentar nenhum crescimento com a distância, as amostras são independentes e ocorre o efeito de aleatoriedade, comumente chamado de efeito pepita puro.

A ocorrência da dependência espacial expressa no variograma segue a hipótese básica na qual dados da vizinhança são mais pareci-

dos do que dados distantes. Em termos simples, podemos dizer que o variograma é um medidor do grau de semelhança entre vizinhos. Como brevemente discutido acima, os variogramas são construídos partindo das pressuposições de estacionaridade da hipótese intrínseca e cálculo da semivariância $\gamma(h)$ dada pela Equação 2:

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

Onde $N(h)$ é o número de pares dos valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$, separados por um vetor h . Segundo Vieira (2000), a caracterização da dependência espacial no variograma (Figura 3.1) dá-se a partir da semivariância na distância zero (i.e. no valor do efeito pepita - C_0), de forma que ocorra um aumento gradual de $\gamma(h)$, proporcional ao aumento da distância h , até um valor máximo (i.e.: intervalo que representa uma variância estruturada - C_1), ponto a partir do qual o variograma se estabiliza em um patamar ($C_0 + C_1$) que correspondente diretamente à distância limite de dependência espacial (i.e.: o valor de alcance - a).

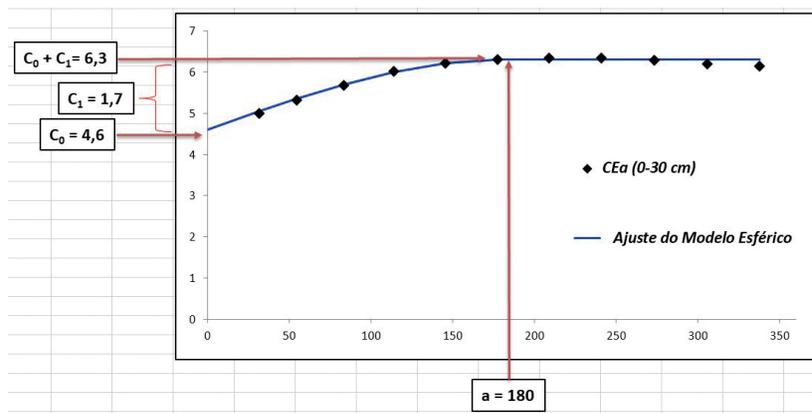


Figura 3.1. Identificação dos parâmetros de ajuste do variograma de CE_a , indicando uma autocorrelação espacial entre valores da variável distantes até 180 m.

O gráfico do variograma (i.e.: variância $\gamma(h)$ versus distância h) representa uma série de pontos discretizados por um espaçamento específico e recursivo no eixo X, usualmente denominado de *lag* (termo em analogia a passo ou pulo), plotando os valores obtidos no cálculo

da semivariância média de todos os pares de observações separados pela mesma distância. Na Figura 3.1 podemos observar um *lag* de aproximadamente 30 m. Este, representa o modelo do variograma empírico, também conhecido como experimental, que é calculado para os valores obtidos nas observações de campo e corresponde ao valor da distância na qual uma função contínua, denominada de modelo do variograma teórico, deverá ser ajustada. Para o cálculo da dependência espacial, os modelos dos variogramas empíricos devem ser ajustados pelo modelo matemático de melhor correspondência (i.e. modelos teóricos), para que se possa obter os valores dos parâmetros de ajuste do variograma. Estes parâmetros são:

- Amplitude variográfica, “alcance” ou “*range*” (notação: “*a*”): Distância na qual a máxima variabilidade é atingida e que corresponde ao aumento da distância entre as amostras;
- Patamar ou “*sill*” (notação: “ C_1 ”): Representa o nível de variabilidade onde o variograma se estabiliza. Corresponde à diferença entre o ponto de maior correlação ou a origem do variograma e o ponto que teoricamente representa a variância populacional e a variabilidade se estabiliza;
- Efeito pepita ou “*nugget effect*” (notação: “ C_0 ”): Descontinuidade na origem do variograma, correspondendo à diferença entre as amostras de maior proximidade e gerada por microrregionalizações, erros de amostragens ou erros de medidas.

Várias formulações e algoritmos utilizando parâmetros do variograma visam classificar e quantificar a estrutura espacial da variação (DIGGLE; RIBEIRO JUNIOR, 2007; OLIVEIRA et al., 2007; PRINGLE et al., 2003; TISSEYRE; MCBRATNEY, 2007). Garcia (1988) considera que uma relação entre os parâmetros “ C_0 ” e “ C_1 ” expressa o grau de aleatoriedade do fenômeno regionalizado, e pode ser avaliada por “*E*”, que representa o efeito pepita relativo. Garcia (1988) categoriza o efeito de pepita relativo da seguinte forma: a) $E < 0,15$ - componente aleatória pequena; b) $0,15 < E < 0,30$ - componente aleatória significativa; e c) $E > 0,30$ - componente aleatória muito significativa. Outros modelos também considerando razões entre estes parâmetros são usados para classificar a estrutura espacial da variação em: forte, média e fraca (CAMBARDELLA et al., 1994; ZIMBACK, 2001).

Deve-se salientar que o ajuste do variograma é um dos aspectos mais importantes da análise geoestatística. O método de tentativa e erro, aliado ao exame de indicadores de melhor ajuste. Alguns coeficientes, como o coeficiente de correção, a raiz quadrada do erro médio (RMSE) e o índice com o de Akaike (IAC) podem auxiliar na validação do modelo escolhido e dos parâmetros para o ajuste do variograma. O ajuste por métodos automáticos, embora possa ser usado, não é o mais adequado para acervos com baixa densidade amostral. Segundo Vieira et al. (2010), uma poderosa ferramenta de validação é o método “*Jack-knifing*” que calcula os parâmetros do erro absoluto e reduzido da estimativa, tornando-a valiosa. Além disso indica qual a vizinhança ideal para a estimativa.

McBratney e Webster (1986) indicam que os modelos mais adequados para os mais variados tipos de situações, na maioria dos casos, serão esférico, exponencial ou gaussiano. A Figura 3.2 mostra o comportamento destes três modelos. Vieira et al. (2010) sugerem que o usuário escolha um destes três modelos segundo o comportamento de seus variogramas para pequenas distâncias (menor do que o alcance), faça o ajuste usando algum método de otimização dos parâmetros C_0 , C_1 e a , e submeta este modelo ao processo de validação cruzada pelo método “*Jack-knifing*”. Esta técnica pode ser utilizada para: avaliar a qualidade do método de estimação; definir o melhor número de vizinhos do ponto sendo estimado; ou avaliar o ajuste variograma teórico aos dados do variograma empírico (SOUZA, 1992). Embora trabalhoso, o método irá eliminar qualquer possibilidade de ajuste inadequado, porque seus resultados indicarão se o ajuste está dentro dos padrões estatísticos requisitados.

Os modelos teóricos para ajuste do variograma mais consagrados em aplicações envolvendo as ciências da terra são apresentados a seguir:

Modelo Exponencial:

O modelo exponencial é o que representa processos que tem a maior perda de semelhança com a distância. Dados de precipitação pluviométrica normalmente são ajustados por este modelo. Atinge o patamar exponencialmente, por isso possui apenas uma estrutura onde d é a máxima distância na qual o variograma é definido. O parâmetro a

é determinado visualmente como a distância após a qual o variograma se estabiliza. Este modelo é determinado pela Equação 3 como segue:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-3 \frac{h}{a})] \quad 0 < h < d \quad (3)$$

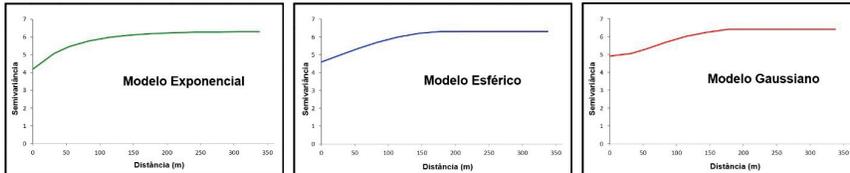


Figura 3.2. Forma gráfica dos três modelos teóricos mais utilizados no ajuste de variogramas típicos de variáveis de processos geomorfológicos.

Modelo Esférico:

O modelo esférico possui duas estruturas, uma com a distância entre zero e o alcance, e outra maior do que o alcance, onde atinge o patamar. O modelo esférico é linear até aproximadamente 1/3 do alcance e pode ser calculado pela Equação 4.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad 0 < h < a \quad (4)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \quad h > a$$

Onde C_0 , C_1 e a são os parâmetros de ajuste, h a distância e $\gamma(h)$ o valor da semivariância para o modelo de ajuste.

Modelo Gaussiano:

O modelo gaussiano inicia com uma queda nos primeiros valores de semivariância para as menores distâncias, e após este início há um crescimento da semivariância até o alcance, onde é atingido o patamar. Tem um crescimento bastante lento no início, até atingir um ponto de inflexão antes do alcance. Os dados mais comuns de ocorrência de modelo gaussiano são cotas topográficas. Ele é definido pela Equação 5, representando os processos naturais mais contínuos que se tem conhecimento.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-3 (\frac{h}{a})^2)] \quad 0 < h < d \tag{5}$$

3.3 Exemplo de Ajuste Manual

A título de auxiliar na compreensão do ajuste do variograma, serão detalhados a seguir os passos do processo de ajuste do modelo numa planilha eletrônica de cálculo (Figura 3.3):

1. Calcular a semivariância (γ) do conjunto de dados da variável no Vesper;
2. Levar arquivo “*Semivar.txt*” para planilha de cálculo, por exemplo no Excel;
3. Dispor as 3 colunas na seguinte ordem: Número de pares – Distância - Semivariância da variável em estudo;
4. Para que a linha do ajuste inicie na distância 0 (zero), inserir uma linha em branco antes da primeira distância e adicionar o valor 0 (zero) para a primeira linha da coluna;
5. Plotar um gráfico de dispersão da distância versus a semivariância;
6. Em campos vazios escolher adicionando manualmente os valores correspondentes aos parâmetros efeito pepita (C_0), variância estrutural (C_1) e alcance (a);

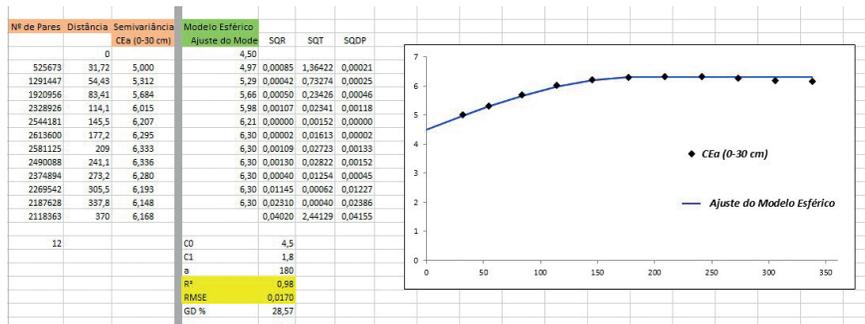


Figura 3.3. Resultado do procedimento para geração do variograma empírico e ajuste do modelo teórico em uma planilha eletrônica.

7. Inserir numa coluna a fórmula do ajuste e calcular para todas as distâncias o modelo que melhor represente os pontos do gráfico

do variograma conforme descritos anteriormente (i.e.: Item 3.1) os modelos para esférico, exponencial ou gaussiano;

8. Inserir a coluna de resultados do cálculo do modelo de ajuste no gráfico do variograma e formatar para linha. O variograma será ajustado ao modelo escolhido;
9. O Grau de Dependência (*GD*) espacial (se fraco <25%, moderado >25% até 75%, forte > 75%) pode ser calculado pela Equação 6 definida por Zimback (2001):

$$GD(\%) = C1 * 100 / (C0 + C1) \quad (6)$$

Para validar o ajuste do variograma, ou seja, para verificar se os parâmetros de ajuste e o modelo de ajuste escolhidos foram adequados, podem ser calculados alguns coeficientes como coeficiente de correlação (r^2) e raiz quadrada do erro médio (RMSE), sendo que, quanto mais próximo do 1 o r^2 for, e quanto menor o valor de RMSE, melhor o ajuste. Para isso é necessário definir as respectivas equações como segue:

1. Adicionar colunas para calcular a Soma de Quadrado do Resíduo (SQR). O SQR mede a soma dos quadrados dos resíduos, exclusivamente relacionados ao erro aleatório medida dentro dos grupos nas diferentes distâncias (Equação 7);

$$SQR = (\gamma(\text{modelo}) - \gamma(\text{variável}))^2 \quad (7)$$

2. Adicionar colunas para calcular a Soma de Quadrado Total (SQT). O SQT mede a variação geral de todas as observações (Equação 8);

$$SQT = (\gamma(\text{variável}) - \text{média } \gamma(\text{variável}))^2 \quad (8)$$

3. Adicionar colunas para calcular a Soma de Quadrado dos Desvios Ponderados (SQDP). O SQDP é a soma dos quadrados dos desvios de cada dado em relação à média do conjunto (Equação 9);

$$SQDP = \left(\frac{nPares}{\sum nPares} \right) * SQR \quad (9)$$

4. Adicionar colunas para calcular o Coeficiente de Determinação (r^2). O r^2 é definido como a relação que mede a proporção da variação total da variável dependente que é explicada pela variação da variável independente (Equação 10);

$$r^2 = 1 - \left(\frac{SQR}{SQT} \right) \tag{10}$$

5. Adicionar colunas para calcular a Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (*RMSE*). O *RMSE* é a medida da magnitude média dos erros estimados (Equação 11);

$$RMSE = \left(\frac{1}{Contagem\ nPares} \right) * \sqrt{\sum SQDP} \tag{11}$$

Na Figura 3.4 são apresentados os ajustes dos modelos teóricos (i.e.: gaussiano, esférico e exponencial) ao modelo empírico dos dados de CE_a , juntamente com os respectivos cálculos de r^2 , *RMSE* e *GD* (%).

Nr de Pares	Distância (m)	Modelo Empírico (CEa 30 cm)				Modelo Gaussiano (4,9; 1,5; 170)				Modelo Esférico (4,6; 1,7; 180)				Modelo Exponencial (4,2; 2,1; 180)				
		SQR	SQT	SQDP	GD %	SQR	SQT	SQDP	GD %	SQR	SQT	SQDP	GD %	SQR	SQT	SQDP	GD %	
0																		
525673	31,72	5,147			5,048764175	0,0097	1,7662	0,0024	5,044715082	0,0105	1,7662	0,0026	5,062280371	0,0072	24,1488	0,0018		
1291447	54,43	5,417			5,29711982	0,0144	1,1215	0,0088	5,347589039	0,0048	1,1215	0,0029	5,452300714	0,0012	26,6514	0,0008		
1920956	83,41	5,086			5,87478762	0,0002	0,6241	0,0002	5,897063986	0,0001	0,6241	0,0001	5,777029029	0,0083	30,6568	0,0075		
2328926	114,1	5,900			6,011666666	0,0125	0,3318	0,0137	5,999916446	0,0100	0,3318	0,0110	5,986428954	0,0075	34,5400	0,0082		
2544381	145,5	6,063			6,233396526	0,0290	0,1706	0,0349	6,212307841	0,0223	0,1706	0,0268	6,11419595	0,0026	37,1951	0,0031		
2613000	177,2	6,185			6,4	0,0462	0,0847	0,0570	6,299386162	0,0131	0,0847	0,0161	6,190452385	0,0000	39,2550	0,0000		
2581125	209	6,276			6,4	0,0154	0,0400	0,0187	6,3	0,0006	0,0400	0,0007	6,23551973	0,0016	39,2550	0,0020		
2490088	241,1	6,343			6,4	0,0032	0,0177	0,0038	6,3	0,0018	0,0177	0,0022	6,262235886	0,0065	39,2550	0,0077		
2374894	273,2	6,393			6,4	0,0000	0,0069	0,0001	6,3	0,0086	0,0069	0,0097	6,277882718	0,0133	39,2550	0,0149		
2269542	305,5	6,429			6,4	0,0008	0,0022	0,0009	6,3	0,0156	0,0022	0,0118	6,287080953	0,0201	39,2550	0,0216		
2187628	337,8	6,456			6,4	0,0031	0,0004	0,0032	6,3	0,0243	0,0004	0,0251	6,292463992	0,0267	39,2550	0,0276		
2118363	370	6,476			6,4	0,1346	4,1660	0,1437	6,3	0,1128	4,1660	0,1151	6,2951	388,7221	0,0952			
					CO	4,9			CO	4,6			CO	4,2				
					C1	1,5			C1	1,7			C1	2,1				
					a	170			a	180			a	180				
					R ²	0,97			R ²	0,97			R ²	0,95				
					RMSE	0,0316			RMSE	0,0281			RMSE	0,0022				
					GD %	23,4375			GD %	26,9841			GD %	59,3750				

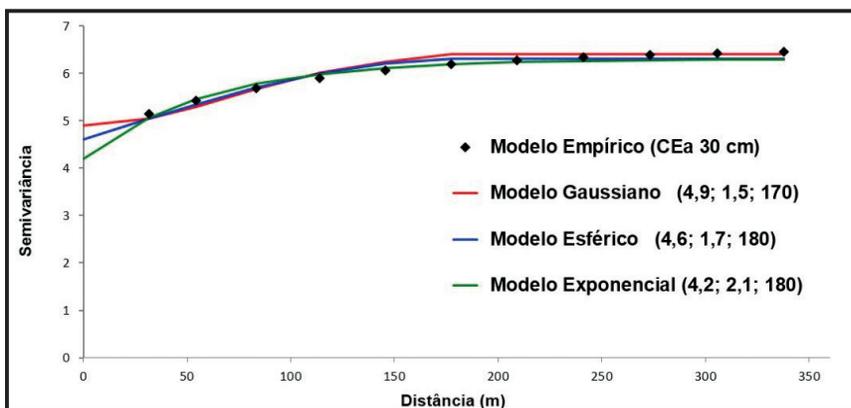


Figura 3.4. Ajuste de três modelos teóricos ao variograma empírico de CE_a , destacando os valores de melhor ajuste de cada modelo entre parênteses, sendo: (C_0 ; C_1 ; a).

3.4 Características da Dependência Espacial

Características específicas da dependência espacial pressupõem o uso de aplicações mais avançadas como processamento em lote, retirada de tendências, análise de anisotropia e cokrigagem não estão no escopo deste livro, bem como não são diretamente disponíveis na interface do Vesper. Estas análises exigem um nível mais avançado de conceitos da geoestatística e são melhor considerados em outros aplicativos disponíveis. Entretanto, é possível considerar estes tipos de análise no Vesper através do uso de linhas de comando no arquivo de Controle (i.e.: "**Control.txt**") como ilustrado na figura abaixo. Este arquivo pode ser utilizado tanto para krigagens repetitivas e sequenciais, por exemplo, para um acervo de dados temporais de um talhão ou para conjuntos de dados espacialmente contíguos de uma mesma variável.

Para avaliar o comportamento da variabilidade espacial de uma variável, os variogramas são elaborados experimentalmente e submetidos à análise de suas características estruturais. Huijbregts (1975) ilustra as propriedades estruturais do variograma como sendo: suporte, zona de influência, estruturas superpostas, anisotropia, continuidade espacial ou comportamento da variável próxima a origem, correção regionalização. A análise destas propriedades exige funções avançadas que não estão disponíveis no Vesper e, portanto, não terão uma apresentação aprofundada. Estas funções envolvem conceitos fundamentais para uma visão mais abrangente do uso das técnicas, e por isso uma breve introdução é feita a seguir sem entrar no mérito das respectivas formulações matemáticas.

Anisotropia

A anisotropia é uma característica comum nos processos de dispersão de elementos dos recursos naturais. O termo indica que a variabilidade ou distribuição espacial de tais elementos ocorre mais intensamente numa direção e menos intensamente em outra direção, não apresentando uma dependência espacial radialmente homogênea. Considerando o mapeamento de teores de potássio, é improvável que esta propriedade se disperse igualmente em todas as direções. A estatística clássica é limitada para tratar apropria-

damente os efeitos anisotrópicos, pois não considera a estrutura de autocorrelação espacial da propriedade. Modelos mais adequados para este objetivo são propostos na geoestatística (CAMARGO et al., 2004).

Aplicações da anisotropia tratam a dependência espacial de acordo com variação numa determinada orientação. Ou seja, são modelos ajustados a um variograma direcional. No caso da variação isotrópica (i.e.: omnidirecional), o variograma amostral depende somente da distância de separação, considerando o mesmo comportamento da variabilidade em todas as direções.

A representação isotrópica caracteriza uma distribuição espacial que pode ser modelada por um único modelo teórico, ou seja, o ajuste do variograma será o mesmo para qualquer direção analisada (Figura 3.5.a). Em contraposto, se os variogramas não são iguais para todas as direções, a distribuição é denominada anisotrópica. Se a anisotropia é observada, e ainda reflete um mesmo patamar com diferentes alcances para o mesmo modelo, então ela pode ainda ser denominada de anisotropia geométrica (Figura 3.5.b). Os modelos de anisotropia buscam dependências espaciais que variam conforme a orientação através da observação dos variogramas obtidos para pares de pontos alinhados em diferentes direções. As convenções direcionais usadas na geoestatística são ilustradas na Figuras 3.6.

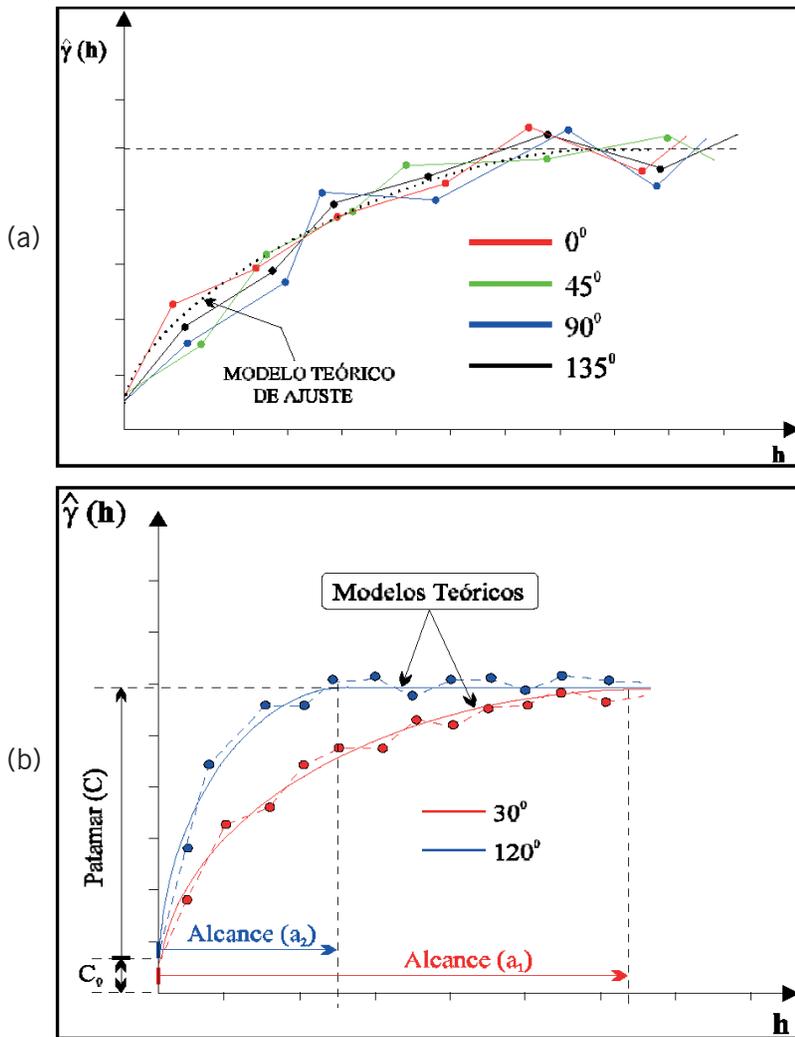


Figura 3.5. Comportamentos da autocorrelação espacial considerando diferentes direções: a) isotrópico, com ajuste único para todas as direções; e b) anisotrópico geométrico, com ajustes em diferentes alcances para direções distintas.

Fonte: adaptado de Pereira et al. (2010).

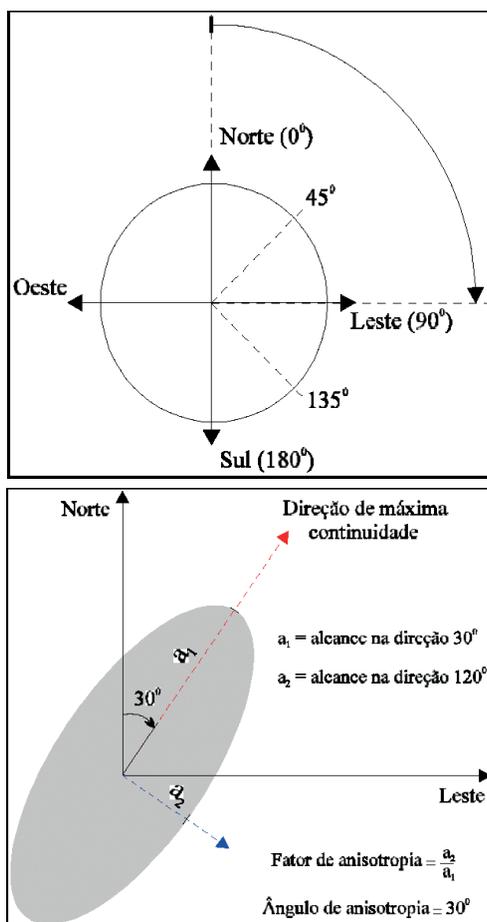


Figura 3.6. Convenções direcionais de anisotropia usadas na geoestatística.
Fonte: adaptado de Pereira et al. (2010).

Tendência

Para a obtenção de um ajuste preciso do variograma, é suposto que a variável regionalizada tenha um comportamento fracamente estacionário, onde os valores esperados, assim como sua covariância espacial, sejam os mesmos dentro de uma determinada área. Nem sempre o comportamento espacial de uma variável tem a característica estacionária, onde a média permanece constante. Quando isto não ocorre, a variável apresenta uma deriva, uma tendência regional (i.e.: “trend” ou “drift”). O que significa que o valor médio da variação

esperada dentro de uma área de vizinhança varia sistematicamente. A Figura 3.7 demonstra que o conceito de estacionaridade está diretamente relacionado com a escala das observações. Se considerarmos o traço como um todo, então as hipóteses estacionárias de segunda ordem serão observadas. Entretanto, o monitoramento intensivo entre os pontos C e D estará refletindo uma tendência não estacionária bem definida. Já no caso do intervalo entre A e B existe a estacionaridade de segunda ordem na mesma escala considerada na seção CD.

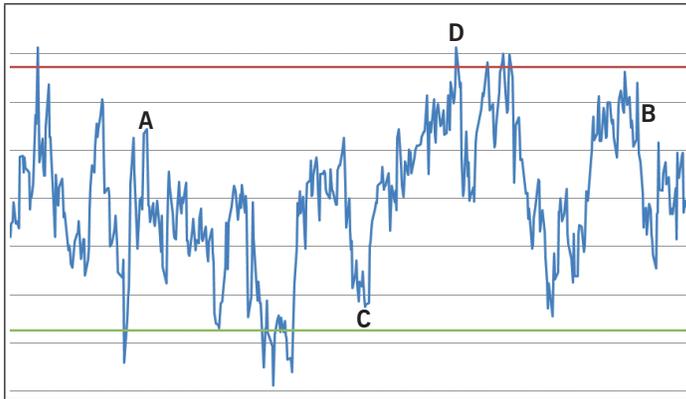


Figura 3.7. Gráfico da relação entre os conceitos de estacionaridade e escala amostral das observações, sendo um processo estacionário de A a B e não estacionário de C a D.

Fonte: adaptado de Pereira et al. (2010).

Em aplicações com ocorrências de não estacionaridade, deve-se considerar a remoção de tendências nos valores das variáveis (CARMARGO et al., 2004), como no caso de distribuições não normais que são comuns para atributos do solo. Nestes casos, formulações numéricas aplicadas aos valores das variáveis possibilitam transformar distribuições não normais em distribuições aproximadamente normais (e.g.: funções logarítmicas e de raiz quadrada). Outro tipo de correção de tendências pode ser aplicado quando a não estacionaridade da média é observada. Nestes casos, a tendência pode ser removida em função das coordenadas (i.e.: X e Y), ajustando-se uma equação polinomial de ordem “n” pelo método dos mínimos quadrados, onde, posteriormente, o resíduo servirá para o ajuste do variograma da variável em estudo (LANDIM; CORSI, 2001).

Camargo et al. (2004) sugerem que a variação espacial de uma variável regionalizada pode ser expressa pela soma de três componentes: a) um ruído aleatório ou erro residual; b) um componente aleatório espacialmente correlacionado; e c) um componente estrutural correlacionado e associado a um valor médio ou a uma tendência constantes. Estes comportamentos são observados na forma geral de variogramas típicos (Figura 3.8) que indicam estas estruturas de variação espacial, respectivamente sendo: a) variogramas aleatórios (i.e.: efeito pepita puro), onde não se observa uma covariância espacial entre os valores e a geoestatística não se aplica (Figura 3.8.a); b) variogramas ideais, onde se observa um patamar bem definido demonstrando um processo estacionário de segunda ordem (Figura 3.8.b); e c) variogramas com tendência, sem um patamar claro que pode indicar um processo não estacionário (Figura 3.8.c).

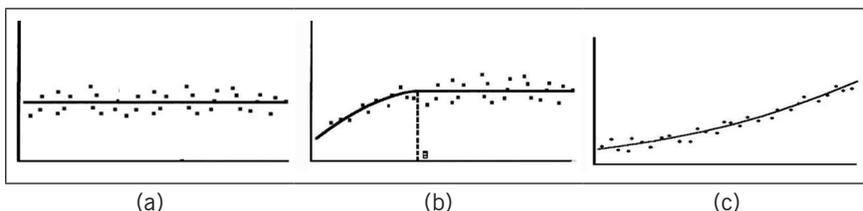


Figura 3.8. Variogramas típicos dos três principais componentes na estrutura de variação de uma variável regionalizada: a) efeito pepita puro; b) componente aleatório espacialmente correlacionado; e c) componente correlacionado e associado a uma tendência.

3.5 Interpolação por Krigagem

A krigagem é um método de estimação geoestatística com denominação sugerida por Matheron em homenagem aos trabalhos pioneiros de Daniel Krige, ao introduzir o uso de médias móveis para evitar a superestimação sistemática de reservas em mineração. (SOARES, 2006). O objetivo da krigagem é estimar valores para qualquer local não observado. Considera uma estimativa sem tendência, com variância mínima e onde a média não deve superestimar ou subestimar valores, minimizando assim a incerteza da estimativa. O método foi concebido sob a hipótese de que a variável regionalizada resultava de um

processo estocástico estacionário de segunda ordem, dando origem as krigagens denominadas simples e ordinária. A krigagem simples considera uma média conhecida, sendo esta constante em todo o domínio, enquanto a krigagem ordinária assume uma média constante, ainda que desconhecida. A krigagem calcula um valor no ponto central de cada célula da grade de interpolação. Este valor estimado está condicionado a estrutura espacial da variável observada (variograma empírico) e aos parâmetros da função de correlação espacial (variograma teórico) ajustada para estes dados.

Segundo Vieira (2000), existem interpoladores que não consideram a dependência espacial, como o inverso do quadrado da distância, média móvel ponderada e outros que interpolam por meio de ajustes de polinômios bidimensionais. Entretanto, estes interpoladores não consideram a estrutura da variação espacial dos valores medidos revelado pelo variograma e, portanto, não determinam com exatidão a variação dos dados interpolados. Na krigagem, o procedimento é semelhante ao de interpolação por média móvel ponderada, exceto que os pesos associados aos vizinhos mais próximos são determinados pelo ajuste do variograma empírico.

3.6 Tipos de Krigagem

A interpolação por krigagem é uma técnica que deriva diferentes métodos de estimação, incluindo: krigagem simples, krigagem ordinária, krigagem universal, krigagem disjuntiva e cokrigagem; entre outras de caráter não lineares como: krigagem indicativa e krigagem fractal (CAMARGO, 1998; SANTOS, 2010). Estas variações do método estendem ou adaptam os algoritmos básicos que não se aplicavam a todas as estruturas de variação espacial. Aplicam-se em função de processos específicos como: estacionários (e.g.: krigagem simples e ordinária), não estacionários (e.g.: krigagem universal e funções intrínsecas) e multivariados (e.g.: cokrigagem). Ainda que o Vesper considere apenas a krigagem ordinária, um resumo dos métodos mais comumente utilizados são apresentados.

Krigagem Ordinária

A krigagem ordinária é um método de estimação linear para uma variável regionalizada que satisfaça a hipótese intrínseca. O método é definido por um algoritmo que considera que os valores de uma variável regionalizada apresentam uma média constante, porém desconhecida. Destina-se a calcular ponderadores ótimos, que minimizem a variância do erro de estimação (DEUTSCH, 1996). A krigagem ordinária é a técnica de interpolação geoestatística mais difundida (LANDIM et al., 2002; SOARES, 2006), já implementada em módulos de análise espacial de vários ambientes SIG. Considerando a dificuldade em quantificar o erro e a variância para os pontos estimados, dado o desconhecimento dos valores reais, a krigagem ordinária faz uso de uma função aleatória que permite atribuir pesos às amostras usadas nas estimativas. Por isso, no algoritmo de krigagem ordinária não há a necessidade de se conhecer o valor da média a priori; isto é, o valor da média é constante, mas como não entra no cálculo, pode continuar desconhecido.

A krigagem ordinária é considerada por Sturaro (1988) como o melhor estimador linear sem viés, em função das seguintes características: a) Linear - as estimativas são feitas através de uma combinação linear dos dados; b) Sem viés - o método objetiva que o erro residual médio seja igual a zero; e c) Melhor estimador - o método objetiva minimizar a variância dos erros. Como em outras formas de krigagem, ela pode ser executada com estimativas por ponto ou por bloco, onde os resultados por bloco apresentam uma maior suavização na superfície estimada.

Krigagem por Ponto ou por Blocos

Os mesmos cálculos da krigagem ordinária podem ser aplicados para estimativas em um ponto, ou em uma área (i.e.: estimativas por blocos). A krigagem por pontos é utilizada para estimar uma variável de interesse em um ponto não observado, a partir dos valores conhecidos de observações vizinhas. A krigagem pontual é uma técnica muito aplicada na representação de dados geofísicos (e.g.: mapas de isovalores e superfícies tridimensionais). Em geral, modelando variações mais abruptas de valores absolutos, sendo adequada para alguns processos da AP.

A krigagem por blocos é uma técnica que tem origem na estimativa de teores médios em painéis, ou blocos, de mineração. Difere da estimativa pontual, à medida que áreas e volumes maiores são representados por pontos amostrais coletados em função da variabilidade natural do depósito sendo avaliado. Onde a estimativa de apenas um ponto central esta unidade (i.e.: área ou volume) não será suficiente para representá-la. A técnica considera uma região com uma área conhecida "A" e um ponto central X_0 ; para a qual, as variâncias entre os pontos amostrados (i.e.: $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) e o ponto X_0 são substituídas pela média das variâncias entre os pontos amostrados e os pontos que ocorrem dentro da área "A". Obviamente, uma krigagem com blocos de 0 x 0 m, equivale a uma krigagem por ponto. Em relação ao uso da técnica em AP, esta estimativa é uma opção a ser avaliada em dados de sensores de produtividade, considerando-se a variação da produtividade dentro de uma área definida pela largura da plataforma no implemento agrícola e a distância percorrida durante o intervalo de leitura (i.e.: 1 segundo). O erro de estimativa associado à krigagem por blocos será menor do que aquele associado à krigagem pontual. Em contrapartida, a estimativa por blocos resulta em mapas mais suavizados (i.e.: valores mais homogêneos). Onde, quanto maior o bloco, mais suavizada fica a representação.

Krigagem Simples

A krigagem simples é utilizada quando estatisticamente se assume que a média é conhecida e constante para toda a área (i.e.: ajuste do variograma global). Difere da krigagem ordinária que considera uma média flutuante ou móvel por toda a área (i.e.: ajuste do variograma local). Estas presunções são muito restritivas para modelar, com realismo, processos geoambientais e, por isso, é uma técnica pouco utilizada. Em geral, transformações de normalização dos dados ou procedimentos de extração de tendências são necessários para viabilizar esta técnica.

Krigagem Universal

É um método similar ao da krigagem ordinária, aplicado quando a variável regionalizada não é estacionária mas apresenta uma tendência e seus resíduos contém a hipótese intrínseca. Esta ocorrên-

cia indica uma média que não é constante e, conseqüentemente, um variograma que não viabiliza a modelagem precisa da estrutura de correlação espacial dos dados considerados. Uma variável regionalizada não estacionária pode ser considerada como constituída por dois componentes: 1) a tendência, que consiste no valor médio esperado dessa variável, dentro de uma certa vizinhança, que varia sistematicamente; e 2) o resíduo que é a diferença entre os valores reais e o valor do deslocamento causado pela tendência. Nestes casos, a krigagem é executada sobre os resíduos. O que impõem o ajuste do variograma sobre os resíduos, para que se possa descrever a estrutura da variação sem tendência. De forma mais direta, se a variável regionalizada representar um processo não estacionário, trabalha-se sobre a estacionariedade residual da variável. Na krigagem universal, o ajuste local é feito mediante um polinômio de ordem “ n ” em função das coordenadas dos pontos estimados (i.e.: X e Y).

Cokrigagem

A cokrigagem é espécie de extensão da krigagem, a qual permite estimar uma variável a partir de suas próprias informações em conjunto com as informações disponíveis sobre outras variáveis espacialmente correlacionadas. É um procedimento de interpolação no qual diversas variáveis regionalizadas podem ser estimadas em conjunto, com base numa correlação espacial multivariada entre si. Aplica-se quando duas ou mais variáveis apresentam uma alta correlação em seus valores numéricos e tenham sido observadas em locais próximos dentro de uma mesma área. Este método é comumente utilizado quando a variável de interesse (i.e.: “primária”) apresenta uma menor densidade amostral, ou correlação espacial, em relação às demais variáveis de apoio (i.e.: “secundárias”). Onde, para cada local amostrado, obtém-se um vetor de valores em lugar de um único valor. A cokrigagem busca melhorar a estimativa da variável primária utilizando outras mais densamente amostradas; ainda que, em geral, apenas uma variável secundária seja usada.

Krigagem Indicativa ou Indicadora

Este tipo de interpolação utiliza procedimentos não lineares para modelar a variabilidade dos atributos. Possibilita a inferência de uma

aproximação discretizada do modelo da distribuição de probabilidade para a modelagem da incerteza sobre seus valores (LIMA, 2006). Uma vantagem importante destes métodos é a possibilidade de se modelar dados temáticos qualitativos, além dos dados de natureza numérica. Assim, pode-se trabalhar com propagação de incertezas para modelos computacionais que envolvam atributos numéricos e temáticos. A krigagem indicativa é aplicada de forma discretizada para encontrar a função de distribuição acumulada de cada ponto a ser estimado. É um método não paramétrico que não considera nenhum tipo de distribuição de probabilidade, a priori, para a variável aleatória. Em contrapartida, ela possibilita a construção de uma aproximação discretizada da função de distribuição que pode ser usada diretamente na estimativa de valores característicos da distribuição, tais como: quartis, valores esperados e variâncias. Portanto, não fica restrita à modelagem de distribuições simétricas, como, por exemplo, a gaussiana (LIMA, 2006). Estes procedimentos possibilitam modelar atributos com alta variabilidade espacial sem o rigor da análise exploratória que busca filtrar amostras com valores discrepantes (i.e.: “*outliers*”) de uma tendência. Entretanto, a krigagem indicadora requisita um alto grau de embasamento teórico na interatividade com suas funções, exigindo o ajuste de um variograma para cada valor de corte considerado.

Seção 2

Utilizando o Vesper

Capítulo 4

O Vesper

Ronaldo Pereira de Oliveira

4.1 Requisições do Sistema

O Vesper é uma ferramenta com funções para a estimativa de variogramas e a predição espacial por krigagem com indicação do erro associado na predição. É um *shareware*², implementando com algoritmos de regressão e métodos quantitativos clássicos de domínio público (MINASNY et al, 2005; WHELAN et al., 1996; WHELAN et al., 2001) e concebido com bases na aplicação prática em processos da variabilidade do solo (WALTER et al., 2001). Atualmente o sistema está vinculado ao Laboratório de Agricultura de Precisão – PAL (i.e.: *Precision Agriculture Laboratory*), inaugurado em 2012, que opera na Universidade de Sydney. Este novo laboratório mantém a equipe e as linhas de pesquisa anteriormente alocadas no antigo *Australian Centre for Precision Agriculture* (i.e.: ACPA – 1995 a 2011), na Universidade de Sydney.

Registro e Aviso Legal

Este aplicativo é disponibilizado gratuitamente para fins acadêmicos na página do PAL³, nestes casos sob a condição de citação da referência Minasny et al. (2005). O seu uso deve ser registrado via um formulário de cadastro de usuários para o envio do número de série que liberará as interfaces de apresentação dos resultados da mensagem impressa “**Un-registered Version**”. O formulário de registro original é apresentado no Anexo I, onde é sugerindo o custo de registros para fins comerciais. Esta taxa de registro é relativamente simbólica e destinada a manutenção do

2 *Shareware* é um aplicativo protegido por direitos autorais e gratuito sob condições, funcionalidades e/ou tempo de gratuidade limitados; fora dos quais o usuário pode ser requisitado a pagar pelo uso.

3 http://sydney.edu.au/agriculture/pal/software/download_vesper.shtml

sistema, tendo boa adesão no segmento de consultorias em associações de AP entre produtores australianos. A janela de abertura exibe uma mensagem de cobrança do registro (i.e.: **“Please Resgister”**) que fica ativa por 10 segundos, sempre que o Vesper é ativado (Figura 4.1). Nesta janela de iniciação, a condição de uso está estampada junto com a referência para fins de citações científicas, e o aviso legal (i.e.: **“Disclaimer”**) conforme descrito no manual do usuário disponível no site do PAL⁴.

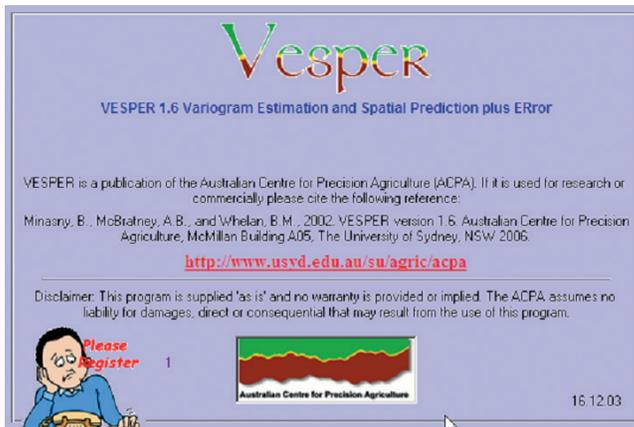


Figura 4.1. Janela de iniciação do Vesper contendo informações sobre as condições de uso, a citação bibliográfica e o aviso legal.

As condições de uso descritas ratificam os direitos autorais do ACPA sobre o uso e a distribuição do Vesper conforme transcrição com o aviso legal do texto original do manual em inglês:

[...] Vesper is a publication of the Australian Centre for Precision Agriculture (ACPA). It is made available for use by the PA Lab. If it is used for research or commercially, please cite the following reference: Minasny, B., McBratney, A.B., and Whelan, B.M., 2005. Vesper version 1.62. Australian Centre for Precision Agriculture.

The PA Lab has taken all care to ensure these programs are operationally sound. However, these programs are supplied 'as is' and no warranty is provided or implied. The PA Lab assumes no liability for damages, direct or consequential that may result from the use of these programs.

Quando iniciada uma nova seção de uso do aplicativo sem registro, a sub-janela “**Register**” indica a condição de versão não registrada (Figura 4.2), que é aberta sobre a janela principal do sistema, solicitando um código de registro. Nesta sub-janela, três botões operacionais estão disponíveis na parte inferior com as seguintes funções: a) “**Register**” - para efetivar o registro após a digitação do nome do usuário e do número de série enviado pelo PAL no campo “**Serial No**”; b) “**Registration Form**” – para visualizar e imprimir o formulário de registro (Anexo I); e c) “**Done**” – para fechar a sub-janela de registro. Outra maneira de acessar a interface de registro durante a execução do Vesper, é clicando no botão operacional “**Register**” no topo da janela principal, como realçado na Figura 4.2.

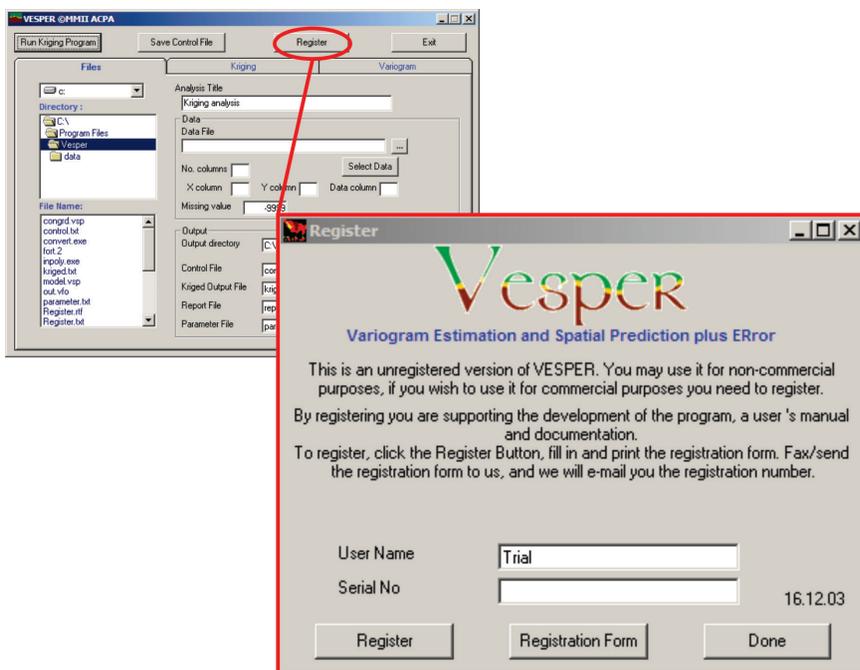


Figura 4.2. Sub-janela de registro do software, ativada na iniciação do Vesper quanto ainda não registrado ou via o botão operacional “**Register**”.

Requisitos do Sistema e Instalação

O Vesper é um aplicativo desenvolvido para ambiente Windows, de origem acadêmica, originalmente codificado em ambientes de pro-

gramação científica (i.e.: MatLab e Fortran 77), e modelado mediante uma interface amigável, em código Visual Basic, escrito para oferecer técnicas de predição espacial robustas na adoção da AP. Estruturado para versões do Windows anteriores a 2004, o gerenciamento de arquivos de controle do Vesper começa a ficar ultrapassado diante da evolução dos sistemas operacionais, ainda que o aplicativo se mantenha funcional e eficiente. O seu código é bastante otimizado e não requisita extensões e/ou o apoio de ferramentas específicas do sistema operacional e viabiliza uma interação facilitada aos usuários da AP.

Seu processo de instalação padrão armazena arquivos primários na pasta de programas do sistema no seguinte caminho: "C:\Arquivos de Programas\Vesper". Esta instalação inclui arquivos compilados do sistema, arquivos de controle e registro dos procedimentos executados, e, adicionalmente, alguns arquivos intermediários durante os cálculos de variograma e krigagem. Entretanto, posteriormente ao Windows 8, seja pela mudança na estrutura de armazenamento ou na de segurança do sistema operacional, alguns arquivos intermediários não aparecem mais na pasta de instalação. Como o acesso aos mesmos pode auxiliar na redução da curva de aprendizado do usuário, sugere-se que a pasta destino para instalação do Vesper seja criada na sua área privada de arquivos.

Outra questão ligada ao sistema operacional está nas configurações regionais e de linguagem definidas para o teclado. A mudança nos padrões de linguagem e teclado, a exemplo da vírgula para ponto na separação decimal numérica, pode criar dificuldades e mensagens de erro durante os processamentos no Vesper, já que a grande maioria de seus arquivos de trabalho são no formato de texto delimitado por vírgulas.

4.2 Apresentação da Interface

Como na maioria dos softwares de geoestatísticos, o Vesper requisita duas etapas distintas para executar uma interpolação espacial, sendo: o cálculo e modelagem do variograma para a área de interesse e a estimativa de valores por krigagem para posições não observadas. Sua interface é simples e basicamente composta por uma única janela principal contendo botões operacionais no topo e três abas distintas, intitulada "**VESPER** © **MMII ACPA**". Estas abas organizam as etapas

de uma forma segmentada e genérica, seguindo o processamento natural e intuitivo no uso das técnicas da geoestatística. As três abas são ilustradas abaixo; sendo: **“Files”** – com os campos para as definições de arquivos de entrada e saída de dados (Figura 4.3); **“Kriging”** – com os campos para as definições de parâmetros do modelo de interpolação por krigagem (Figura 4.4); e **“Variogram”** - com os campos para as definições de cálculo do variograma (Figura 4.5).

Sua interface também possibilita o controle interativo e manual para vários procedimentos. No cálculo do variograma permite o ajuste fino e visual do variograma global com barras de rolagem que facilitam o manuseio ágil das simulações de ajuste empírico. Na estimativa por krigagem gera uma grade de interpolação por intermédio de um contorno irregular definido manualmente, e ainda permite o ajuste empírico com o controle da vizinhança e do bloco de sustentação das interpolações. Na etapa final da krigagem para geração de mapas, o Vesper apresenta uma sub-janela de processamento das estimativas da krigagem ordinária em tempo real, onde é possível acompanhar a progressão das interpolações, e, ao fim do processamento, outra sub-janela **“Vesper Map”** pode ou não ser ativada, contendo os resultados da interpolação, mais especificamente: o mapa de predição (i.e.: **“Predicted”**), com as estimativas da variável em locais não observados, e o mapa do erro associado a esta predição, com valores do desvio padrão da regressão em cada ponto estimado (i.e.: **“Std Deviation of Prediction”**).

O Vesper oferece uma gama de opções para gerenciar e trabalhar dados dispersos e heterogêneos, variando em suas densidades amostrais, distribuição espacial, dependência espacial e incerteza na observação. As funcionalidades para atender estas requisições incluem: cálculo do variograma empírico, ajuste automático e manual do variograma teórico, geração do contorno e da grade de interpolação, interpolações por krigagem e exportação de resultados. Para as interpolações por krigagem dois métodos estão disponíveis: a krigagem Simples, utilizando o ajuste do variograma global, mais aplicado para casos de baixa resolução amostral; e a krigagem Ordinária, utilizando o ajuste automático de variogramas locais. Ambas técnicas de krigagem podem ser executadas pelos métodos de interpolação por pontos ou por blocos

Permite a análise variográfica em dados georreferenciados, interativamente visualizando e ajustando variogramas, com de nove opções

de modelos teóricos automaticamente ajustados. Quando utilizada com um embasamento teórico e critério, esta variografia automática e interativa pode ser entendida como uma significativa e facilitada ferramenta de aprendizado e maturação de conceitos no estudo da autocorrelação espacial. A exemplo da sub-janela “**Vesper1.6**” de execução da krigagem ordinária (Figura 4.6), onde três gráficos dinâmicos permitem ao usuário acompanhar o processamento em tempo real. O programa processa a krigagem ordinária em modo global ou local. Na krigagem com parâmetros do variograma global, um único variograma é ajustado para toda a área através de uma janela interativa, que é descrita no Capítulo 5. Outra opção, é executar a krigagem utilizando parâmetros de ajustes de variogramas locais (HAAS, 1990), considerando apenas dados na vizinhança do ponto sendo estimado. O ajuste local envolve: a) a busca por vizinhos de cada ponto da grade de estimação; b) o cálculo do variograma empírico com o agrupamento de vizinhos identificados; c) o ajuste automático do variograma do agrupamento local; e d) a estimativa do valor desconhecido e do erro associado a esta estimativa. Os variogramas são ajustados automaticamente por regressão não-linear por mínimos quadrados (MARQUARDT, 1963).

Abas de Controle dos Procedimentos

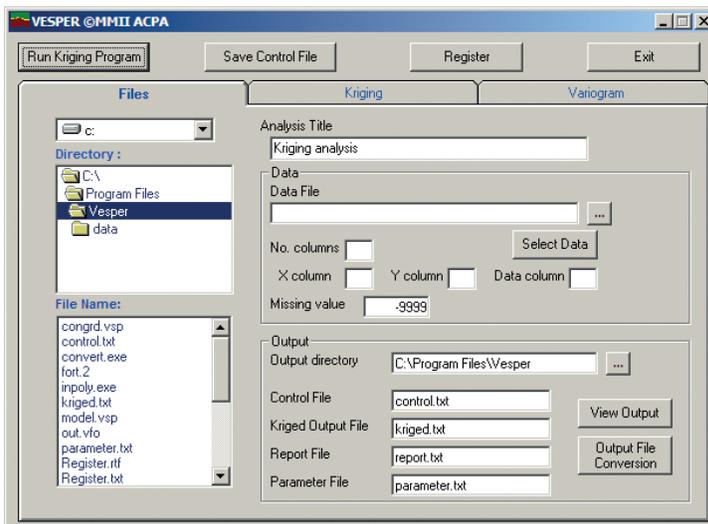


Figura 4.3. Aba “Files” da janela principal para definição de arquivos de entrada e saída.

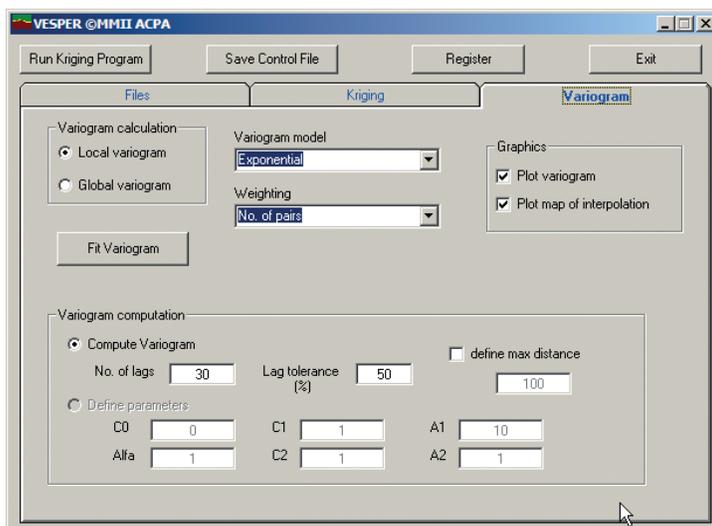


Figura 4.4. Aba “*Variogram*” da janela principal para análise e ajuste do variograma.

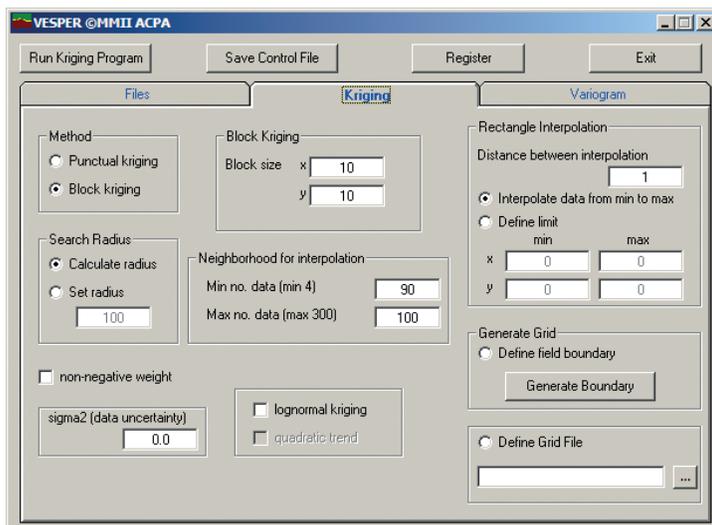


Figura 4.5. Aba “*Kriging*” da janela principal para geração da grade de interpolação, delineamento do contorno da área de estudo e definição dos parâmetros da krigagem.

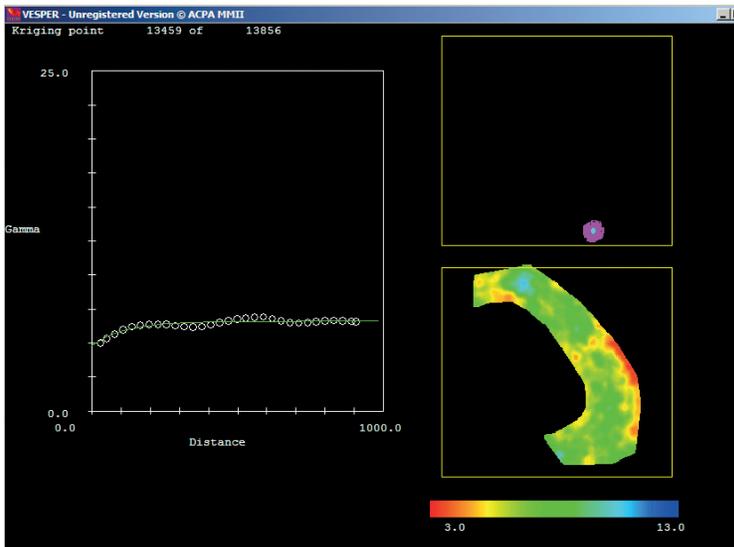


Figura 4.6. Sub-janela de krigagem com interpolação de mapas em tempo real, executando a krigagem ordinária de CE_p por pontos e com ajuste automático de variogramas locais.

Botões Operacionais

Os Botões operacionais (Figura 4.7) controlam comandos centrais do Vesper com quatro funções específicas como segue:

“Run Kriging Program”	Execução da interpolação por krigagem;
“Save Control File”	Salvar o arquivo de controle de uma seção de análise;
“Register”	Acessar o formulário de cadastro e registrar o número de série; e
“Exit”	Sair do sistema.



Figura 4.7. Botões operacionais da janela principal resumindo os comandos centrais do Vesper.

4.3 Gerenciamento de Arquivos

Arquivo de Entrada

O Vesper aceita dados de entrada em arquivos no formato de texto delimitado por vírgulas, espaços ou tabulações (e.g.: “.txt”, “.csv” ou “.dat”), que podem ser criados num editor de texto simples ou exportados por uma planilha eletrônica. Podem conter até 50 variáveis numéricas ou textuais obrigatoriamente georreferenciadas. Como no exemplo da Figura 4.8, os dados de entrada devem estar organizados de forma que cada ponto de observação no campo corresponda a um registro (i.e.: linha da planilha), o qual deverá conter os valores das variáveis dispostas em campos delimitados (i.e.: colunas da planilha) incluindo: dois campos com coordenadas cartesianas (i.e.: X e Y em metros) e ao menos um campo com os valores da variável a ser analisada (e.g.: CE_a , NDVI, Produtividade, N e K). Não há uma ordem definida para disposição dos campos ou a obrigatoriedade de uma linha de cabeçalho, mas sugere-se que seja definida uma linha de cabeçalho e que o par de coordenadas estejam posicionados nos dois primeiros campos na ordem X, Y (Figura 4.8). Esta disposição visa facilitar a seleção das variáveis de entrada na interface “**File Preview:**” da sub-janela “**Data file**”, como detalhado adiante. Registros sem os valores das variáveis (i.e.: em branco) são desconsiderados durante o processamento mediante o preenchimento destes campos com o valor predefinido pelo Vesper como “-9999”. Caso estes campos já estejam preenchidos com outro tipo de *flag* (sinalizador), este valor pode ser definido no campo “**Missing value**” no menu de opções “**Data**” na aba “**Files**” (Figura 4.3).

As coordenadas devem conter valores de referência cartesiana, em metros, ao invés de valores de coordenadas esféricas (i.e.: Latitude e Longitude), em graus. Isto porque, um grau longitudinal não representa uma distância fixa, a qual varia em função da posição no globo. Isto é, a diferença de um grau quando se está próximo ao Equador representa uma distância muito maior do que a diferença de um grau próximo aos Polos. Por estas razões, as coordenadas geográficas devem ser convertidas para coordenadas cartesianas antes de dar entrada no Vesper. Nota-se que dados oriundos de sistemas

GNSS são, em geral, capturados em coordenadas geográficas, ou seja Latitude e Longitude, não comportando cálculos de distâncias entre os pontos observados. Um exemplo de georreferenciamento em SIG é apresentado no Item 7.4.

A rigor a seleção do arquivo de entrada pode ser feita por duas interfaces disponíveis na aba "**Files**" (Figura 4.3), com realçado nos contornos em azul e vermelho na Figura 4.9. Em azul, na parte esquerda da aba, o arquivo de entrada é selecionado numa interface de barras de rolagem programadas na interface do Vesper. Alternativamente em vermelho, a seleção pode ser feita no campo "**Data File**" do menu de opções "**Data**", digitando o caminho completo do endereço do arquivo ou clicando no botão operacional "...", que disponibiliza uma janela no padrão do Windows Explorer.

Após a seleção do arquivo de entrada é necessário identificar as três variáveis que vão ser processadas, sendo os dois campos de coordenadas e um da variável analisada. O procedimento para seleção das variáveis de entrada é feito na interface da sub-janela "**Data file**" (Figura 4.10), a qual é ativada clicando no botão operacional "**Select Data**" do menu de opções "**Data**" na aba "**Files**". Esta sub-janela apresenta o caminho do arquivo de entrada, o número de campos identificados na leitura do arquivo (i.e.: "**No. columns**"), os campos correspondentes as variáveis de análise e uma prévia dos primeiros registros do arquivo na interface "**File Preview:**". Usando a interface "**File Preview:**" como referência da disposição das variáveis, o usuário define os números dos campos correspondentes aos dados que serão salvos para fins de variografia e krigagem ao clicar "**OK**" na sub-janela "**Data file**"; estes sendo: "**X Column**" para a coordenada X, "**Y Column**" para a coordenada Y e "**Data Column**" para a variável a ser analisada.

Na primeira execução do aplicativo após a instalação, os valores dos campos "**X Column**" e "**Y Column**" são definidos para as posições 1 e 2 respectivamente, e o campo "**Data Column**" para a posição relativa a última variável do primeiro arquivo de entrada. Como no exemplo da Figura 4.10 onde o valor 19 é atribuído ao campo "**Data Column**" ao se selecionar o arquivo de entrada apresentado na Figura 4.8. Com esta seleção, a análise variográfica e a krigagem serão executadas para os valores de zinco (Zn) presentes no décimo nono campo do arquivo.

As posições dos três campos salvos em uma seção de análise são armazenadas no arquivo de controle (i.e.: “**control.txt**”) e mantidas na interface da próxima seção de análise. O arquivo de controle é apresentado no Item 4.5, onde estas posições podem ser redefinidas pelas variáveis de programação “**icol_x**”, “**icol_y**” e “**icol_z**” (Anexo II). Para evitar erros de execução ou a troca de resultados neste procedimento o usuário deve se certificar sobre a identificação correta da posição dos campos correspondentes aos valores das coordenadas e da variável a ser analisada.

```
X,Y,Pt,pH,H2O,Al,Ca,Mg,Na,K,K_FESURV,H+Al,P,S,T,V,Cu,Fe,Mn,Zn
586163.472,8001250.35,27.6,4.0,4.2,3.0,156.89,4.5,13.3,6.7,11.2,2.60,1.7,6.1,13.6,1.24
586259.104,8001249.93,28.6,6.0,6.3,0.410,346,4.3,8.5,10.1,14.3,70,1.05,4.45,13.7,1.14
586354.736,8001249.51,29.6,7.0,6.6,3.1,0.371,327,3.8,12,10.6,14.4,74,0.88,4.39,15.5,2.42
586450.368,8001249.09,30.6,5.0,6.3,2.8,0.257,186,4.5,34.1,9.8,14.2,69,0.52,3.21,14.1,1.08
586118.248,8001205.05,31.6,3.0,4.4,2.4,0.90,67,4.9,11.1,7.12,59,0.93,4.72,15.3,0.8
586356.468,8001164.18,32.6,8.0,7.1,3.2,0.429,348,3.6,11.1,11.4,15.76,1.07,4.11,13.6,1.07
586449.925,8001149.1,33.6,2.0,4.2,3.0,98,70,5.1,12.8,6.5,11.7,56,1.03,7.93,8.53,0.73
586545.557,8001148.68,34.6,4.0,5.8,2.9,0.199,135,4.9,39.9,9.2,14.2,65,0.63,4.64,13.7,1.11
586545.114,8001048.69,35.6,4.0,4.1,2.3,0.207,142,4.5,11.1,6.9,11.4,61,1.01,7.25,10.8,0.84
586640.745,8001048.26,36.6,4.0,5.9,3.1,0.222,137,4.1,15.8,9.6,13.7,70,0.97,4.08,11.6,1.16
586553.162,8000961.24,37.6,1.0,4.1,2.4,0.39,40,4.8,14.2,6.6,11.4,58,0.69,5.14,9.34,0.64
586640.302,8000948.28,38.6,1.0,4.1,2.7,0.101,69,5.3,10.5,7.1,12.3,57,0.9,4.78,13.7,0.71
586735.932,8000947.85,39.6,4.0,3.7,2.2,0.117,78,4.12,1.6,2.10,2.61,0.89,5.69,10.4,1.25
586639.859,8000848.29,40.6,3.0,3.3,2.2,0.195,118,4.13,8.6,10.60,0.83,6.7,8.85,0.53
586735.489,8000847.86,41.6,1.0,3.8,2.2,0.43,45,4.9,23.6,6.1,11.1,55,0.73,5.76,8.83,0.87
586831.119,8000847.44,42.6,2.0,3.7,2.0,0.82,67,4.5,17.5,5.9,10.4,57,0.73,5.28,9.69,0.85
586735.045,8000747.88,43.6,5.0,4.7,2.2,0.129,81,3.3,18.5,7.2,10.5,69,0.43,4.9,9.34,0.53
586830.674,8000747.45,44.6,0.2,9.2,0.74,59,4.5,18.7,5.1,9.5,53,0.51,6.13,7.05,0.99
586913.578,8000730.32,45.6,1.0,2.8,2.2,0.35,33,4.3,15.5,1.9,4.54,0.59,7.04,8.7,0.76
586734.601,8000647.89,46.6,3.0,4.3,2.6,0.74,59,4.6,43.8,7.1,11.7,61,0.45,4.8,7.89,0.37
586830.23,8000647.46,47.6,2.0,3.7,2.4,0.47,47,4.1,17.7,6.2,10.3,60,0.47,5.61,7.49,0.44
586925.859,8000647.04,48.6,3.0,3.1,1.9,0.35,35,3.8,5.5,1.8,1.63,0.83,7.61,12.6,0.78
586734.157,8000547.9,49.6,2.0,3.2,2.2,0.70,57,4.1,11.3,5.6,9.7,57,0.83,6.15,9.44,0.62
586829.786,8000547.48,50.6,1.0,3.7,2.2,0.47,44,4.1,23.6,10.1,59,0.69,7.67,10.4,0.61
```

Figura 4.8. Formato do arquivo texto delimitado por vírgulas com dados de entrada.

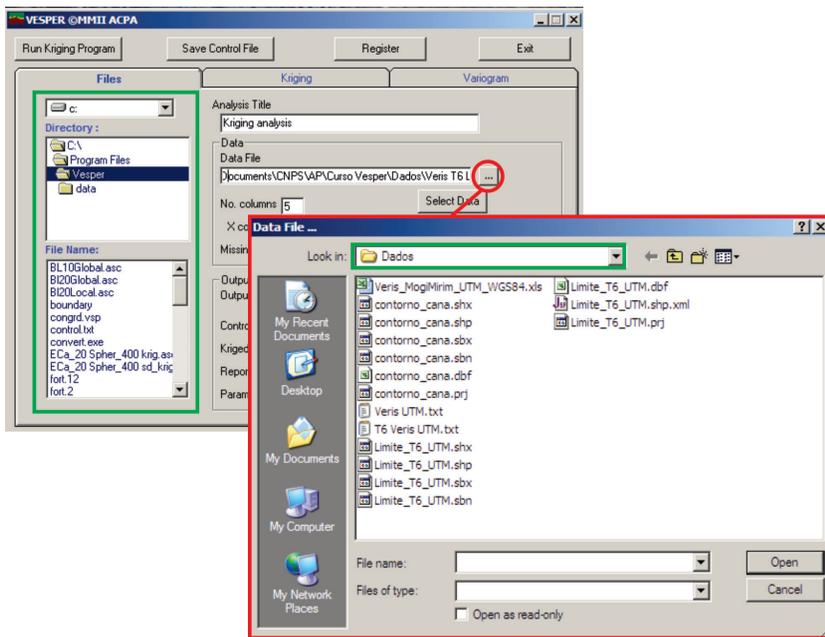


Figura 4.9. Opções de interfaces para seleção do arquivo e da variável de entrada aba “Files”.

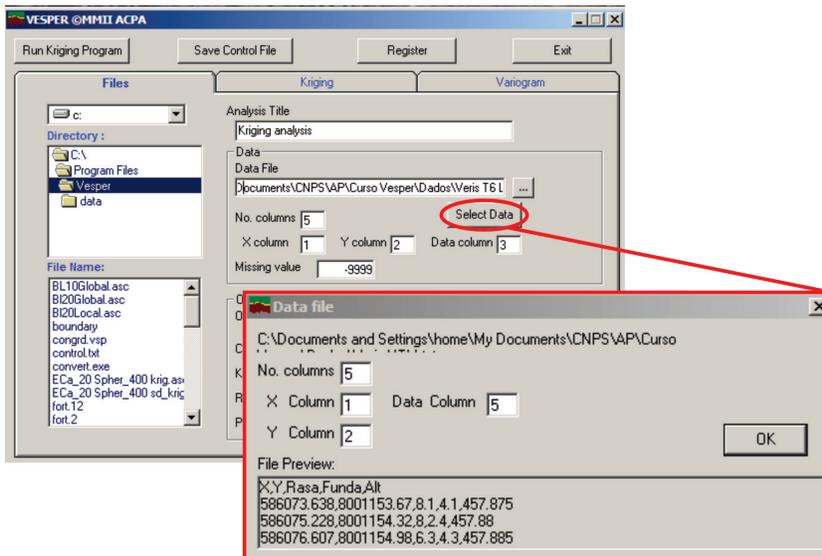


Figura 4.10. Opções da aba “Files” com interfaces para seleção do arquivo e da variável de entrada.

Entendendo os Arquivos de Saída

A organização dos arquivos gerados pelo Vesper pode ser controlada no menu de opções “**Output**” da aba “**Files**” (Figura 4.3), onde é possível o usuário redefinir a pasta de destino e/ou renomear os arquivos de saída (Figura 4.11). Estas redefinições devem ser efetuadas logo após a seleção do arquivo de entrada, e sempre antes do início de uma nova seção de análises. Alterações feitas durante a seção de procedimentos, por exemplo entre o ajuste do variograma e a krigagem, podem forçar mensagens de erro ou mesmo o encerramento involuntário do programa com perda dos resultados. Uma vez que a pasta destino também é utilizada para a criação de arquivos temporários comuns a vários processamentos.

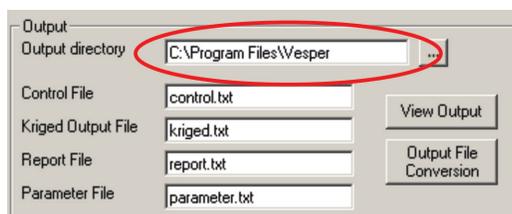


Figura 4.11. Definição da pasta de trabalho na interface “**Output**” da aba “**Files**” onde serão armazenados os arquivos resultantes da krigagem e de controle do processamento.

Estes arquivos de saída são gerados no formato de texto delimitado (“**.txt**”) e direcionados para a pasta de instalação do Vesper. Esta pasta de destino pode, e deve, ser alterada no campo “**Output directory**” do menu de opções “**Output**” (Figura 4.11), em particular quando o aplicativo é instalado com versões de sistema operacional posteriores ao Windows 7. Caso não renomeados no início da seção de análise, estes arquivos serão sobrescritos e os resultados anteriores perdidos a cada nova interpolação por krigagem executada. Estes resultados tem as seguintes funções:

“**control**”

Arquivo com as chaves de controle das variáveis operacionais utilizadas nos algoritmos de interpolação por krigagem, e também utilizado para executar uma sequência de processamentos em “lote” de grandes volumes de dados.

<i>“parameter”</i>	Arquivo gerado como arquivo temporário contendo os parâmetros do ajuste do variogram que serão usados na krigagem ordinária e os valores de RMSE para cada ponto de predição.
<i>“kriged”</i>	Resultado da krigagem de uma variável, contendo para cada ponto da grade de predição um indexador (<i>“ID”</i>), o par de coordenadas do ponto (<i>“X”</i> e <i>“Y”</i>), o valor predito e o desvio padrão da estimativa (Figura 4.12).
<i>“report”</i>	Arquivo com um relatório de registros, contendo referências gerais da seção de análises, parâmetros usados nos procedimentos e mensagens da operação de predição. Como por exemplo, o texto digitado no campo <i>“Analysis Title”</i> da aba <i>“Files”</i> é definido como título da seção de análises.

Ao fim do procedimento de krigagem, os mapas resultantes das predições e do erro associado a estas estimativas podem ser visualizados clicando no botão operacional ***“View Output”*** do menu de opções ***“Output”*** (Figura 4.12). Os mapas ilustrados na sub-janela ***“Vesper Map”*** são construídos com os resultados da krigagem armazenados no arquivo definido no campo ***“Kriged Output File”*** (i.e.: ***“kriged.txt”*** caso não renomeado). Uma vez que este arquivo seja renomeado e salvo numa pasta de trabalho específica, os mapas resultantes da krigagem poderão ser visualizados posteriormente selecionando a pasta no botão operacional ***“...”*** do campo ***“Output directory”*** e digitando o nome do arquivo no campo ***“Kriged Output File”***.

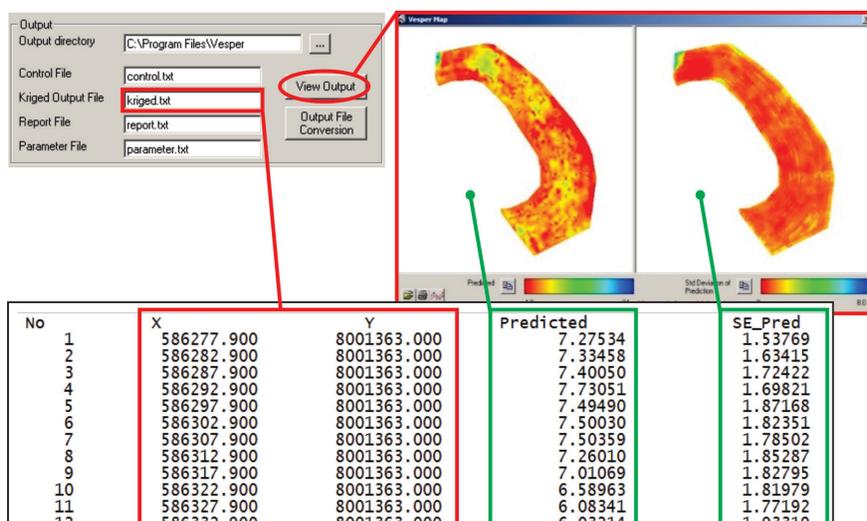


Figura 4.12. Sub-janela “*Vesper Map*” ativada pelo botão operacional “*View Output*” do menu de opções “*Output*” para visualização dos resultados da krigagem armazenados no arquivo de texto “*kriged.txt*”.

4.4 Exportação de Resultados

Os mapas resultantes da krigagem podem ser convertidos para arquivos de texto em outros formatos ou extensões compatíveis com ambientes SIG específicos clicando no botão operacional “*Output File Conversion*” do menu de opções “*Output*” da aba “*Files*” (Figura 4.13). Este botão ativa a sub-janela “*Vesper Output File Conversion*” com interfaces para a definição de parâmetros e nomes dos arquivos convertidos para exportação. Nesta sub-janela são definidos: no campo “*Vesper Output File*” o arquivo com os resultados da krigagem a ser convertido; no campo “*Converted file*” do menu de opções “*Text File*” o arquivo exportado no formato de texto delimitado (Figura 4.13); e nos campos “*Kriged grid file*” e “*Std. Dev of kriged grid file*” do menu de opções “*ASCII Grid*” os arquivos exportados em grades matriciais de formatos ASCII específicos dos ambientes de SIG Surfer e ArcView (Figura 4.14).

É importante observar que as pastas de destino definidas nos campos “*Output directory*” das interfaces do menu de opções “*Output*”

e da sub-janela **“Vesper Output File Conversion”** devem ser a mesma. Caso os nomes dos arquivos ou pastas de destino sejam alterados durante os processamentos de uma seção de análise, corre-se o risco de perder os resultados e ter que repetir a execução do procedimento de krigagem, o qual pode ser de grande custo computacional dependendo do número de registros de entrada e do refinamento da resolução da grade de predição.

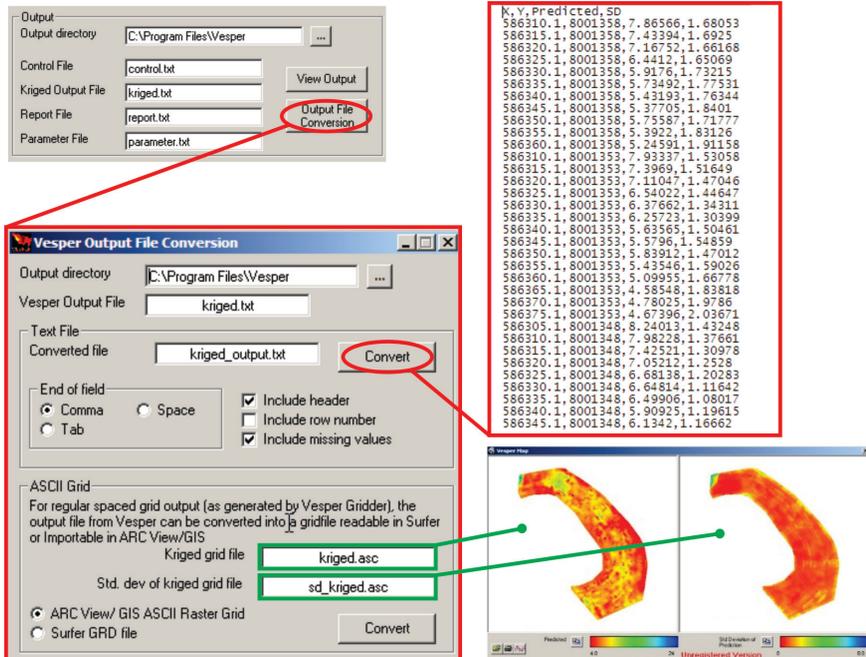


Figura 4.13. Sub-janela **“Vesper Output File Conversion”** com interfaces para a definição de parâmetros e nomes dos arquivos convertidos para exportação.

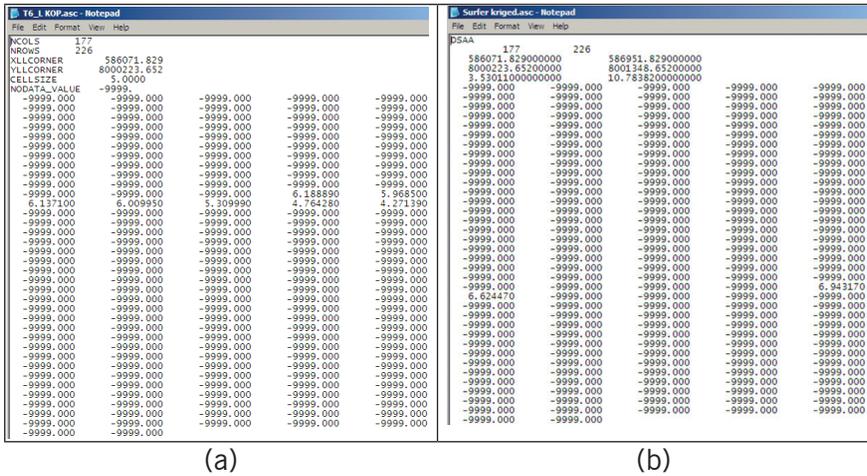


Figura 4.14. Exemplo dos arquivos convertidos nos formatos SIG “ASCII Raster Grid” disponíveis para exportação, sendo: a) ArcView; e b) Surfer.

4.5 Aplicações Avançadas

Algumas das técnicas para tratar as características da dependência espacial apresentadas no Item 3.4, como anisotropia e tendência, não estão disponíveis diretamente na interface do Vesper, mas podem ser simuladas com procedimentos alternativos, ou mesmo externos ao Vesper, importando os resultados em softwares que possam complementar o processamento requisitado. Alguns procedimentos avançados podem ser configurados no Vesper por intermédio de um arquivo de controle dos processamentos. Predefinido pelo sistema com o nome de “*control.txt*”, este arquivo de controle é um arquivo de texto que funciona como um livro de registros e predefinição das variáveis operacionais para controle do código de execução, podendo ser facilmente editado. Por exemplo, variáveis contendo as convenções direcionais para a análise de anisotropia (e.g.: “*isearch*”, “*igeos*”, “*icircs*”, “*psin*” e “*pcos*”) são predefinidas com valor zero no arquivo de controle padrão do Vesper, assumindo assim a automação da análise de processos isotrópicos. Diante da requisição de uma análise anisotrópica os valores destes campos podem ser editados no corpo do arquivo de controle padrão e salvos num arquivo de controle para este fim específico.

Os arquivos de controle podem servir também para aplicações avançadas com processamentos recursivos ou execuções em *batch* (i.e.: arquivo em lote que executa uma lista de comandos sequenciais) para grandes acervos de dados. Utilizando diferentes arquivos de controle, é possível executar uma sequência predefinida de processos para automatização de análises específicas. O passo a passo para se definir estas aplicações não faz parte do conteúdo deste livro por não existir uma referência no manual disponibilizado em inglês. Para questões sobre estes procedimentos avançados, o usuário deve contar a equipe responsável pelo desenvolvimento do Vesper. O exemplo de um arquivo de controle típico é apresentado no Anexo II.

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.

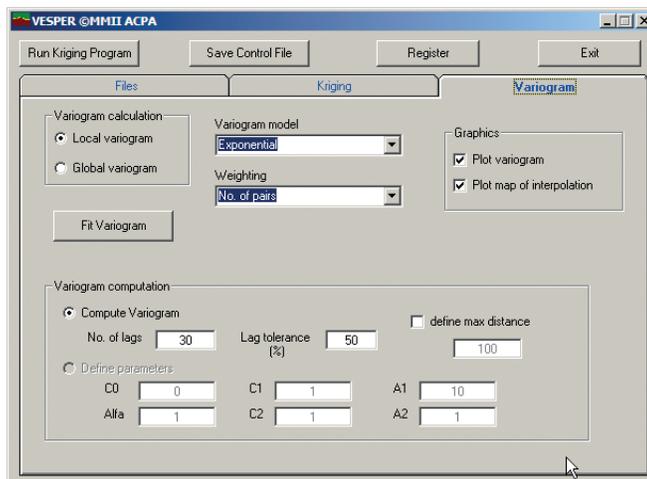


Figura 5.1. Aba “Variogram” para ajuste de parâmetros e seleção do modo em que o variograma será calculado, sendo: “Local variogram” ou “Global variogram”.

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.

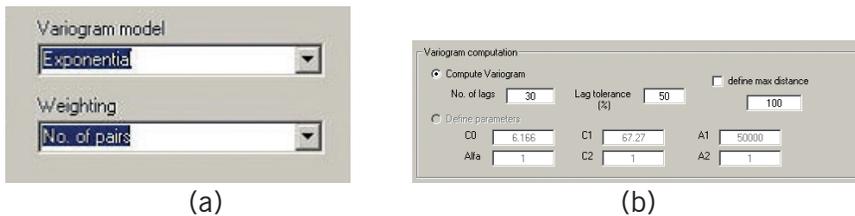


Figura 5.2. Pré-seleção de parâmetros da aba “**Variogram**” para o ajuste de variogramas em modo local, sendo: a) o modelo teórico (“**Variogram model**”) e o tipo de ponderação (“**Weighting**”) do ajuste; e b) definição dos parâmetros para **cálculo do variograma empírico** no menu de opções “**Variogram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

“Lag tolerance (% 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%);
“No. lags”	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
“Define max distance”	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.

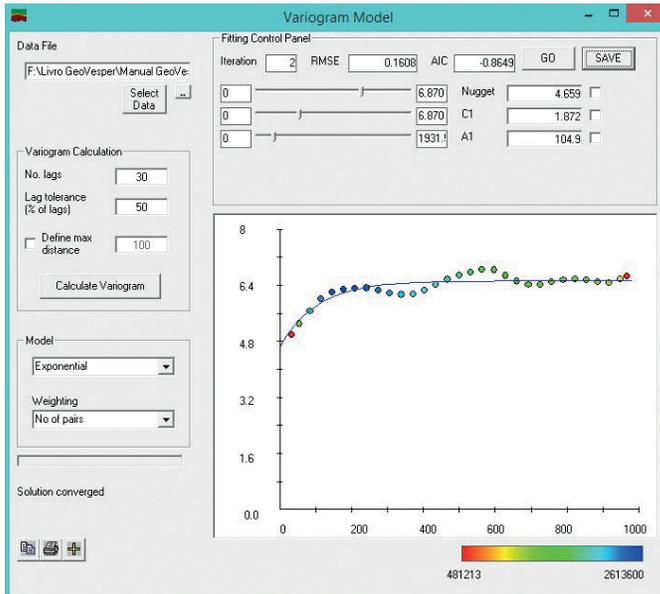


Figura 5.3. Sub-janela “*Variogram Model*” com interface interativa para cálculo do variograma empírico, o ajuste automático e/ou manual dos modelos teóricos e avaliação do ajuste.

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).

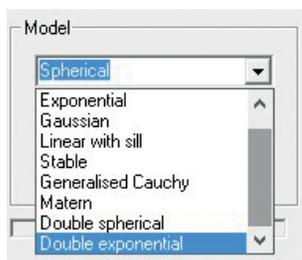


Figura 5.5. Barra de rolagem na seção **“Model”** para seleção interativa do modelo teórico de melhor ajuste automático, na sub-janela **“Variogram Model”**.

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.

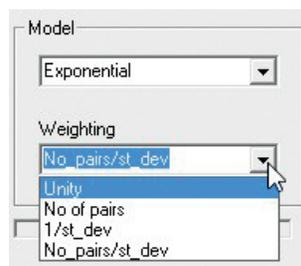


Figura 5.6. Barra de rolagem “**Weighting**” para seleção do modo de ponderação dos pesos no ajuste automático do variograma, na sub-janela “**Variogram Model**”.

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.

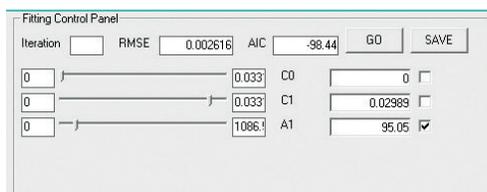


Figura 5.7. Menu de opções “**Fitting Control Panel**” com interface interativa para refinamento manual dos parâmetros de ajuste, enquanto observando o comportamento do variograma teórico e a da qualidade do ajuste.

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.

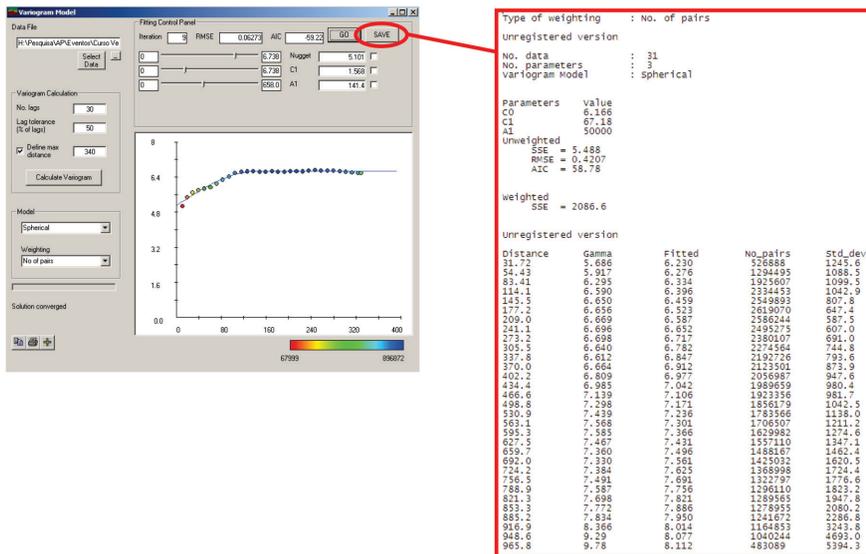


Figura 5.8. Arquivo com resultados do ajuste selecionado (i.e.: tipo de ponderação, tamanho das lags, valores estimados, número de pares e índices de validação).

Capítulo 6

Ronaldo Pereira de Oliveira

Predição Espacial

6.1 Krigagem no Vesper

Com base nas definições e fundamentos dos métodos de interpolação por krigagem discutidos anteriormente nos Itens 3.5 e 3.6, este capítulo apresenta as opções de processamento da krigagem disponíveis na aba “*Kriging*” da janela principal do Vesper, onde, apenas as opções de menu e a lógica sequencial dos procedimentos são ilustradas com base nas aplicações e conceitos típicos já apresentados.

O Vesper executa métodos clássicos de krigagem, como a krigagem simples e a krigagem ordinária, segundo estimativas de variogramas globais e locais, respectivamente. O processamento ainda inclui as opções de interpolação por pontos ou por blocos. Uma interface amigável permite ao usuário criar, interativamente, um contorno limítrofe da área considerada, e a geração de uma grade regular de interpolação. O principal diferencial do Vesper está numa abordagem de análise automática de variogramas locais, que tem a capacidade de ajustar o processo estimação segundo as diferenças locais na estrutura de variação espacial da variável considerada.

De maneira simples, a krigagem é um método de predição espacial do valor de uma variável regionalizada em um determinado local não observado, dentro da área de interesse. É um procedimento de interpolação exato, que leva em consideração os valores observados dentro de uma vizinhança do ponto a ser estimado. Na estimativa por krigagem, as distâncias de ponderação entre os vizinhos mais próximos são embasadas em parâmetros obtidos na análise variográfica, levando em consideração a distância entre amostras e a sua estrutura de agrupamento.

De maneira bem pragmática, Camargo et al. (2004) resumem as seguintes características da krigagem:

- Método geoestatístico estimador que leva em consideração as características espaciais de autocorrelação de variáveis regionalizadas;
- Nas variáveis regionalizadas uma certa continuidade espacial é esperada, o que permite que os dados obtidos por amostragem de certos pontos possam ser usados para parametrizar a estimação de pontos onde o valor da variável seja desconhecido;
- Ao ser constatado que a variável não possui continuidade espacial na área estudada, não há sentido lógico em estimar/interpolarm usando-se a krigagem.

6.2 Definição de Parâmetros de Krigagem

A aba “**Kriging**” na janela principal do Vesper (Figura 6.1) resume os parâmetros necessários para o processamento de krigagem ordinária. Estes podem ser subdivididos em quatro blocos distintos. O lado direito da aba concentra os campos de definição da grade regular de interpolação, sendo a resolução espacial da grade, em metros, e o limite de interpolação, seja por uma área retangular ou por um contorno, definido pelo usuário. Os campos de opções “**Method**” e “**Block Kriging**” definem o tipo de krigagem, se por pontos ou blocos, e, para a segunda opção, as dimensões do bloco. Os campos localizados no centro da aba, “**Search Radius**” e “**Neighborhood for interpolation**”, definem as condições de vizinhança da análise. E por fim, na parte inferior, apresenta três outros parâmetros opcionais que serão detalhados a diante.

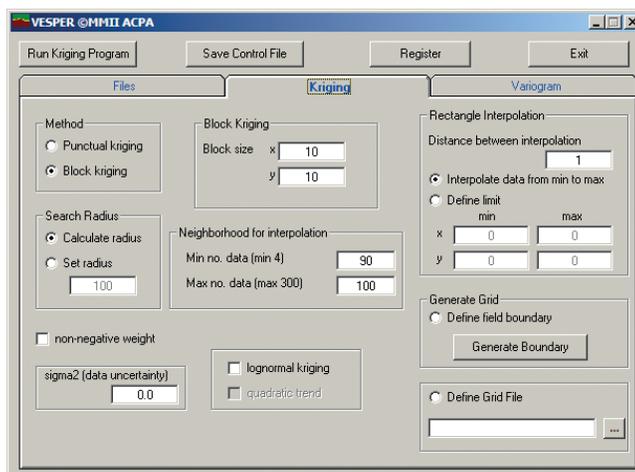


Figura 6.1. Aba de krigagem (i.e.: “*Kriging*”) na janela principal do Vesper, com as opções para definição dos parâmetros da krigagem como: resolução da grade de interpolação, limite da área para interpolação, modo de krigagem (i.e.: por ponto ou por bloco), condições de vizinhança e outros parâmetros alternativos.

6.3 Geração da Grade e do Contorno de Interpolação

A interpolação por krigagem tem base em uma grade regular de estimação. Ou seja, uma matriz de pontos regularmente espaçados, para os quais os valores da variável são desconhecidos e serão preditos a partir dos pontos vizinhos onde o valor absoluto da variável é conhecido. No Vesper esta grade pode ser gerada de diferentes maneiras.

Na opção “*Rectangle Interpolation*”, o limite da área a ser interpolada pode considerar os limites mínimos e máximos da extensão do retângulo envolvente dos dados, ou uma subárea retangular, definida pelos pares de coordenadas de uma diagonal, onde o espaçamento regular entre os pontos da grade é definido por uma distância em metros, gerando uma grade regularmente espaçada com contorno retangular. Estas opções se aplicam em casos onde o talhão tem dimensões retangulares bem definidas, não havendo necessidade do delineamento de um contorno, pois a própria extensão da nuvem de dados define o contorno limítrofe da área.

Na opção “**Generate Grid**”, o arquivo do contorno limítrofe da interpolação pode ser carregado, se previamente gerado no Vesper ou por outro sistema (e.g.: coordenadas coletadas com GNSS). O botão “Generate Boundary”, se ativado, abrirá uma sub-janela interativa, onde os pontos do arquivo de dados brutos serão plotados (Figura 6.2.a), e um contorno vetorial poderá ser definido manualmente, por meio de vértices, com o uso do *mouse*. A definição manual do contorno se aplica quando o talhão tem geometria irregular, triangular ou poligonal, onde o contorno toma a forma que engloba toda a nuvem de pontos e confina a geração da grade na superfície delimitada.

Para interagir no delineamento do contorno, o seguinte procedimento é necessário:

1. No ponto onde se pretende iniciar o contorno, clicar com o botão direito do *mouse*;
2. Em seguida, clicar com o botão esquerdo do *mouse* nos locais onde se pretende definir os vértices do contorno, de forma recursiva, no sentido horário ou anti-horário, até completar todo o contorno da nuvem de pontos.
3. Ao retorna nas proximidades do ponto inicial, e após definir o último vértice; pressione o botão direito do *mouse*, outra vez, para finalizar o contorno.
4. Ao encerrar o contorno, a sub-janela de confirmação “**Vesper Interface**” vai confirmar se o arquivo texto do contorno será salvo (Figura 6.2.b). Caso confirmado, a janela “**Save boundary as ...**” vai permitir o arquivo de contorno ser salvo na pasta e com o nome desejados.

Uma vez salvo, o arquivo de contorno poderá ser carregado para fins de processamento e geração de uma grade regular delimitada pelo contorno. Para isto, deve-se:

1. Selecionar o botão radial “**Define field boundary**”;
2. A sub-janela “**Open Boundary File ...**” abrirá automaticamente, para a seleção do arquivo de contorno gerado no procedimento anterior;
3. Após selecionado o arquivo de contorno, a sub-janela “**Grid Generator**” abrirá automaticamente para definição do nome e do local de armazenamento da grade de interpolação gerada;

4. No campo “**Distance between interpolation**”, dimensionar a resolução espacial da grade, em metros, e depois clicar em “**Go**”.

Uma última opção “**Define Grid File**” considera a existência de uma grade regular previamente definida, seja ela delimitada por um contorno irregular ou por uma região retangular. Neste caso, basta selecionar o botão radial “**Define Grid File**” e clicar no botão de seleção da pasta e do nome do arquivo da grade já existente.

Após todas as definições para geração do contorno e da grade de interpolação, outros parâmetros relativos ao método de interpolação por krigagem podem ser definidos em relação a: a) dimensão espacial da estimativa, se por ponto ou por bloco; b) vizinhança do ponto sendo estimado; e c) transformações matemáticas alternativas.

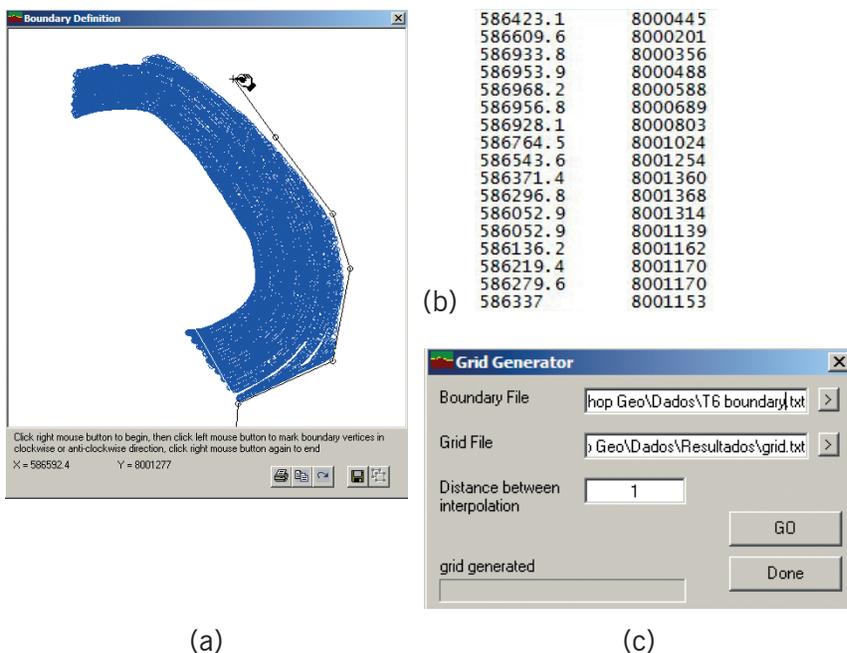


Figura 6.2. Sub-janelas da aba de krigagem para geração interativa do contorno e da grade regular de interpolação, sendo: a) delineamento manual do contorno limítrofe da grade de interpolação; b) arquivo de texto delimitado contendo os pares de coordenadas dos vértices do contorno; e c) definição da resolução espacial (i.e.: distância entre os pontos interpolados) para geração da grade de estimativa.

6.4 Krigagem por Ponto ou por Bloco

A escolha do método para krigagem é feita na parte superior esquerda da aba de krigagem (Figura 6.3), no campo método de estimação, “**Method**”; selecionando-se alternativamente entre os botões radiais com as opções de krigagem pontual, “**Punctual kriging**”, ou por blocos, “**Block kriging**”. O outro campo relativo a esta definição do método de krigagem está associado ao tamanho do bloco, “**Block Kriging**”, onde a largura e o comprimento do bloco são definidos em metros. As características destas abordagens são detalhadas no Item 3.6, onde:

- A krigagem por pontos estima um valor exato para cada ponto da grade de interpolação, favorecendo assim a representação de fenômenos com mudanças mais abruptas na variação espacial de seus valores; e
- A krigagem por blocos prediz um valor segundo a média ponderada das observações de uma área centrada nos pontos da grade de interpolação, tendendo a suavizar mais os valores estimados, quanto maior for o tamanho do bloco. Em contrapartida, um bloco de 0 m² é equivalente a krigagem por pontos. O tamanho de bloco é pré-definido no Vesper (i.e.: 10 m²) considerando uma resolução espacial do cálculo que é compatível com a área definida pela largura típica das plataformas e a velocidade de operação das colheitadeiras usadas na AP. O que permite analisar a variabilidade na mesma escala em que a variável foi monitorada.

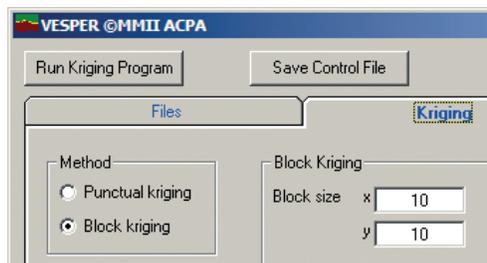


Figura 6.3. Escolha da dimensão espacial para o cálculo de interpolação, sendo o método pontual, ou por blocos.

6.5 Parâmetros de Vizinhança

Os números mínimos e máximos de pontos vizinhos a serem considerados na krigagem são definidos no campo de vizinhança da interpolação, “**Neighbourhood for interpolation**” (Figura 6.4), onde um mínimo de 90 pontos é predefinido considerando a krigagem com ajuste local do variograma. Este valor tem base na formulação matemática, considerando que um grupamento de vizinhos com menos de 90 pontos pode comprometer a estatística para o cálculo preciso do variograma. No caso da amostragem de atributos de solo por grade regular, em geral com poucos pontos observados em relação a área sendo analisada, este valor tem que ser diminuído para viabilizar a busca pelo número mínimo de vizinhos.

No campo que define o raio de busca por vizinhos, “**Search Radius**”, é possível definir uma distância até a qual, um ponto conhecido vai ser considerado como vizinho do ponto da grade de interpolação sendo estimado. Com a opção “**Calculate radius**” selecionada o raio de busca é calculado de forma automática em função da densidade amostral. A opção é predefinida e indicada pela equipe envolvida no desenvolvimento do Vesper.

Search Radius	
<input checked="" type="radio"/> Calculate radius	
<input type="radio"/> Set radius	
	<input type="text" value="100"/>
Neighborhood for interpolation	
Min no. data (min 4)	<input type="text" value="90"/>
Max no. data (max 300)	<input type="text" value="100"/>

Figura 6.4. Parâmetros de busca por pontos vizinhos na ponderação do cálculo do ponto sendo estimado na grade de interpolação.

6.6 Parâmetros Alternativos

Os parâmetros de krigagem localizados na parte inferior da aba são de caráter de pesquisa, não visando aplicações genéricas e sendo pouco documentados no manual do usuário em inglês. Por tanto, são pouco utilizados. Caso haja dúvidas ou interesse no uso destas funções, a equipe responsável pelo desenvolvimento deverá ser contatada.

Os parâmetros alternativos de krigagem são:

“Lognormal Kriging”	Executa a transformação log-normal nos dados de entrada antes da interpolação, podendo ser útil quando a análise exploratória indica que a variável não apresenta normalidade na sua distribuição;
“Non-negative weight”	Função utilizada para evitar valores extremos (e.g.: probabilidades, densidades ou concentrações negativas); e
“Sigma2 (data uncertainty)”	Fornece uma estimativa da variância ou incerteza nos dados.

6.7 Execução da Krigagem

A execução da interpolação por krigagem só poderá ser iniciada após a definição de todos os parâmetros necessários aos seguintes blocos de procedimentos como já descritos, sendo:

- Definição do método de krigagem (i.e.: por ponto ou bloco) e das condições de busca pelo grupamento de vizinhos para a interpolação (i.e.: raio de busca, número mínimo e máximo de pontos);
- Definição do limite e da resolução da grade de interpolação; e
- Definição do modo de ajuste do variograma, sendo local ou global (Item 5.1). O ajuste em modo local é automático, basicamente aceitando ou alterando valores predefinidos na aba **“Variogram”** para as variáveis de cálculo e ajuste do variograma. Em modo global, o ajuste deverá ser feito clicando clicar no botão operacional **“Fit Variogram”** para ativação da sub-janela **“Variogram Model”**.

Para iniciar a execução é necessário o clicar no botão operacional **“Run Kriging Program”** da janela principal como descrito no Item 4.2 (Figura 4.7). A janela de execução em tempo real é automaticamente ativada e inicia o processamento caso todas as definições estejam bem definidas (Figura 6.5). No lado esquerdo da janela o cálculo e ajuste do variograma acontece dinamicamente em modo local para cada grupamento de vizinhos dos pontos da grade de interpolação, e

em modo global apresenta um variograma estático como ajustado na sub-janela “**Variogram Model**” para todos os pontos observados. Do lado direito no topo é apresentada a janela móvel da krigagem com ajuste local, onde o ponto azul claro representa o local da grade de interpolação sendo computado, e a núvem de pontos em magenta o agrupamento de vizinhos dentro do raio de busca. No modo global, a grade amostral é representada por pontos fixos em magenta. Na parte inferior do lado direito, o mapa resultante da krigagem vai sendo construído ponto a ponto na resolução da grade de interpolação com o valor estimado da variável em análise, representado por uma legenda distribuída entre valores mínimos, em vermelho, e máximos, em azul. Ao fim o usuário é indagado se deseja abrir a janela de apresentação dos resultados com o mapa da predição dos valores e do erro associado as estimativas.

Quando os arquivos de entrada têm mais de 5.000 registros, as funções de predição espacial são facilitadas com a opção de krigagem utilizando o ajuste de variogramas locais. 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 (Figura 6.6), restringindo a krigagem de se o modo local estiver selecionado e indicando o uso do modo global. Para arquivos com mais de 5000 pontos (Figura 6.7), sugerindo o uso do modo local se o modo global estiver selecionado.

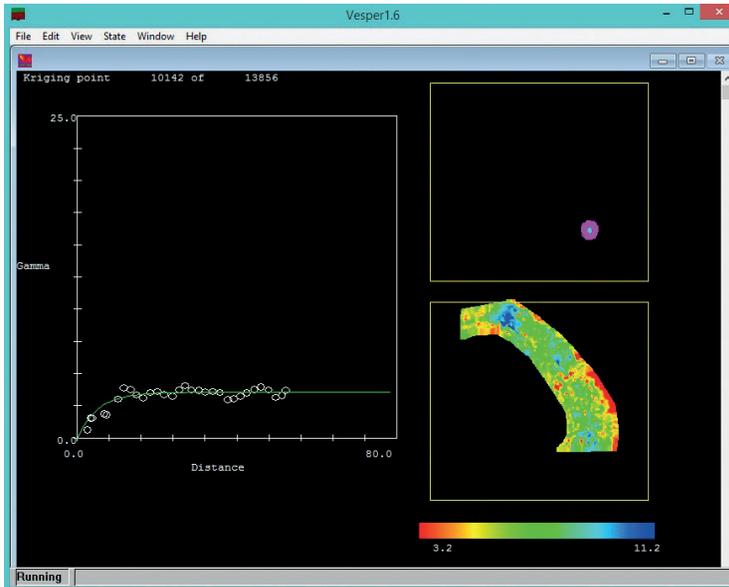


Figura 6.5. Sub-janela de krigagem com dados em alta densidade amostral, apresentando o ajuste dinâmico de variogramas locais a esquerda e, a direita, o ponto sendo estimado em azul, o grupamento de vizinhos em magenta e o mapa das estimativas atualizado em tempo real.

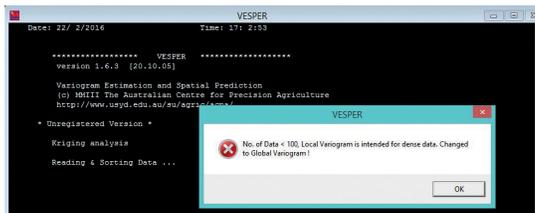


Figura 6.6. Janela de alerta restringindo a krigagem em modo local para arquivos com menos de 100 observações, neste caso indicando o uso do modo global

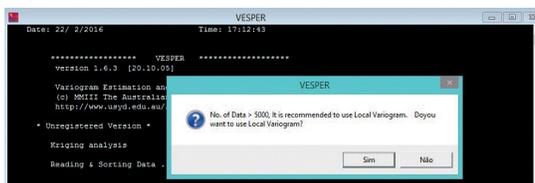


Figura 6.7. Janela de alerta sugerindo a krigagem em modo local para arquivos com mais de 5000 observações.

Seção 3

Depois do Vesper

Capítulo 7

Importação em SIG

Ronaldo Pereira de Oliveira

7.1 Mapas Georreferenciados

Após os procedimentos de interpolação por krigagem, os resultados da estimativa em grade regular podem ser importados em SIG, resultando em mapas temáticos no formato *raster* (i.e.: matricial ou grade regular) contendo a espacialização contínua de isovalores do atributo analisado. No SIG, outras bases de dados georreferenciados podem ser visualizadas, superpostas e agrupadas. O uso de ambientes de geoinformação requisitam conhecimentos de preceitos cartográficos e da topologia de mapas digitais que devem ser considerados pelo usuário e podem ser encontrados em várias publicações de referência (STAR; ESTES, 1990). Estas camadas de informação permitem uma análise espacial multivariada capaz de integrar covariáveis ambientais e estruturais (e.g.: imagens de satélite, mapas de relevo, hidrografia e bases de infraestrutura cartográficas) com vários fatores da produção que tenham sido estimados sobre uma grade de interpolação comum (i.e.: atributos de fertilidade do solo e produtividade da planta na mesma resolução espacial), como no exemplo considerado por Valladares et al. (2009) para o planejamento do esquema amostral de solos em área de vinhedo.

No caso da AP, a interpretação dos mapas derivados da interpolação permite ao usuário identificar as regiões no talhão onde o fenômeno estudado é mais uniforme do que em outras. Dessa forma, a utilização das técnicas de geoestatística permitem amparar decisões estratégicas e operacionais em relação ao sistema de manejo diferenciado a ser adotado, seus potenciais impactos ambientais e produtividade esperada das diferentes variedades. Essa é uma contribuição da

geoestatística para o desenvolvimento de uma estratégia de produção agrícola eficiente e sustentável com a adoção consciente da AP.

7.2 Conversão em ASCII Raster Grid

Este capítulo resume-se a descreve o passo a passo no processo de importação dos arquivos resultantes da krigagem no Vesper, como definidos no Item 4.4, “**Conversão de Resultados**”. Os procedimentos são relativos aos arquivos de texto convertidos no Vesper para o formato “**ARC View/GIS ASCII Raster Grid**” (Figura 7.1), uma vez direcionados a ilustrar a geração de mapas matriciais como camadas de informação em ambientes SIG. Para isto é utilizado o software livre Quantum GIS, o qual, em sua nova versão QGIS 2.12 ‘Lyon’, lançada em Outubro de 2015, apresenta uma rotina de interface facilitada para a importação de arquivos textos delimitados em diferentes formatos e um comando específico para importação direta de diversos formatos de grades matriciais em texto ASCII (i.e.: *American Standard Code for Information Interchange*). O QGIS trabalha diretamente ou exporta formatos proprietários do ArcView, como *Shape File* (i.e.: arquivo no formato vetorial com extensão “.shp”) e *Grid File* (i.e.: arquivo no formato matricial com extensão “.grd”), que são os mais comumente usados para intercâmbio de mapas digitais.

plataformas. Os pacotes binários (instaladores) para a versão estável atual 2.12, em 23/10/2015, estão disponíveis para serem baixados via *download* em português⁵.

Dúvidas podem ser colocadas em um grupo de discussão⁶ ou consultadas no guia de usuário disponível⁷, ambos em português.

7.4 Importação de ArcView ASCII Raster Grid

Depois de baixar, instalar e iniciar o QGIS O seguinte roteiro deverá ser seguido, a partir da janela principal, para a geração de uma camada de informação georreferenciada.

1. Na opção **“Camada”** do menu principal de comandos, navegar até **“Adicionar Camada”** e selecionar **“Adicionar Camada Raster”** para abrir a sub-janela de importação de dados no formato *raster* (Figura 7.2);
2. Na sub-janela de importação de dados **“Abrir uma fonte de dados GDAL suportada”**, clicar na barra de rolagem de formatos de arquivos suportados, e selecionar o formato **“Arc/Info ASCII Grid”** (***.asc *.ASC**); navegar até a pasta de trabalho e selecionar o arquivo de extensão **“.asc”** e clicar em **“Abrir”** (Figura 7.3);
3. Na sequência, a sub-janela **“Seletor de Sistema de Coordenadas de Referência”** (Figura 7.4) é automaticamente aberta para que se possa definir os parâmetros de georreferenciamento cartográfico que são relativos a área de estudo. Esta etapa envolverá uma definição mínima dos parâmetros cartográficos de um mapa, como discutido a seguir.
4. Na barra de rolagem **“Sistema de referência de coordenadas do “world””** da sub-janela **“Seletor de Sistema de Coordenadas de Referência”**, selecionar, entre as inúmeras combinações de projeções e Datum oficiais para a cobertura de todo o globo. Uma vez identificada o sistema de referência, clique no botão **“OK”** (Figura 7.4). Os dados krigados aparecerão na janela do QGIS como

5 http://www.qgis.org/pt_BR/site/forusers/download.html

6 <http://groups.google.com/group/qgisbrasil>

7 <http://qgisbrasil.org>

uma camada incorporada a base, com referências de localização, topologia e escala de representação (Figura 7.5)

As informações cartográficas necessárias para uma precisão da base de geoinformações são definidas por parâmetros de georreferenciação associadas as observações por ocasião da coleta ou as bases oficiais de referenciamento cartográfico. Como os dados importados do Vesper, por requisição no formato entrada, já se encontram em coordenadas retangulares de projeções cartográficas (i.e.: coordenadas X e Y, em metros); os mesmos parâmetros definidos na transformação dos dados brutos, originalmente em sistema de coordenadas geográficas (i.e.: Latitude e Longitude, em graus), devem ser definidos nesta sub-janela. Os dados brutos são coletados com referências diretas do GNSS disponível, em geral fornecidas em coordenadas esféricas WGS 84, que são posteriormente convertidas em um sistema de projeção cartográfica de referência, usualmente em coordenadas cartesianas da projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), o qual requisita a definição da zona UTM associada a localização da área considerada. Atualmente, existe um novo sistema de referência definido para o Brasil, o SIRGAS 2000, em substituição ao tradicionalmente usado, o SAD 69 (i.e.: South American Datum 1969). No caso da área sob monitoramento intensivo considerada como exemplo neste livro, localizada em Rio Verde, GO, definiu-se a projeção UTM, Zona 22 Sul, no sistema SIRGAS (Figura 7.4). Conceitos básicos de cartografia são necessários para uma gerência precisa dos mapas georreferenciados em ambiente SIG, e podem ser consultados em Banker (1965) e IBGE (1998). Caso os parâmetros cartográficos não sejam conhecidos no momento da importação, o usuário poderá clicar no botão “Cancelar”, o que não impedirá a importação. A nova camada continuará aparecendo com suas georreferências em coordenadas cartesianas, entretanto, deslocada em relação aos sistemas de referência oficiais.

Outra alternativa para a adição de uma camada raster, em substituição ao passo 1 do procedimento descrito acima, está no ícone “**Adicionar Camada Raster**” () , localizado na Barra de Ferramentas “**Gerenciar Camadas**”, como realçado em vermelho na Figura 7.2. Posteriormente seguindo os passos de 2 a 4 como especificados acima. Uma vez o mapa já importado, este poderá ter seus valores categorizados, em modo contínuo, em intervalos definidos pelo usuário

ou mesmo automaticamente. As classes podem ser associadas a uma legenda de cores que facilitará a visualização dos padrões de variação espacial (Figura 7.6). Para isto é necessário seguir os seguintes passos:

1. (Figura 7.6). Para isto é necessário seguir os seguintes passos: No painel **“Camadas”**, navegar sobre o nome da camada importada, neste exemplo **“ CE_a kriged Arc”**, e clicar com o botão da direita do mouse para ativar o menu **“Propriedades”** (Figura 7.6.a) e abrir a sub-janela **“Propriedades da Camada”**;
2. Selecionar a aba **“Estilo”**, da sub-janela **“Propriedades da Camada”**, para definir a renderização desejada para o mapa importado, com legenda de cores segundo a classificação em faixas de valores de CE_a .
3. Na interface **“Renderização da Banda”** na janela da aba **“Estilo”**, selecionar **“Banda simples falsa-cor”** na barra de rolagem **“Tipo de renderização”**;
4. Aceitar as seguintes predefinições: **“Banda 1”** na barra de rolagem **“Banda”**; **“Linear”** na barra de rolagem **“Cor de interpolação”**; e **“Contínuo”** na barra de rolagem **“Modo”**;
5. Selecionar a tabela de cores entre as opções disponíveis na barra de rolagem na interface **“Gerar novo mapa de cores”**, e clicar no botão **“Classificar”** (Figura 7.6.b).
6. Por fim clicar no botão **“OK”** para visualizar o mapa de CE_a com legenda de cores em intervalos absolutos da variável (Figura 7.7)

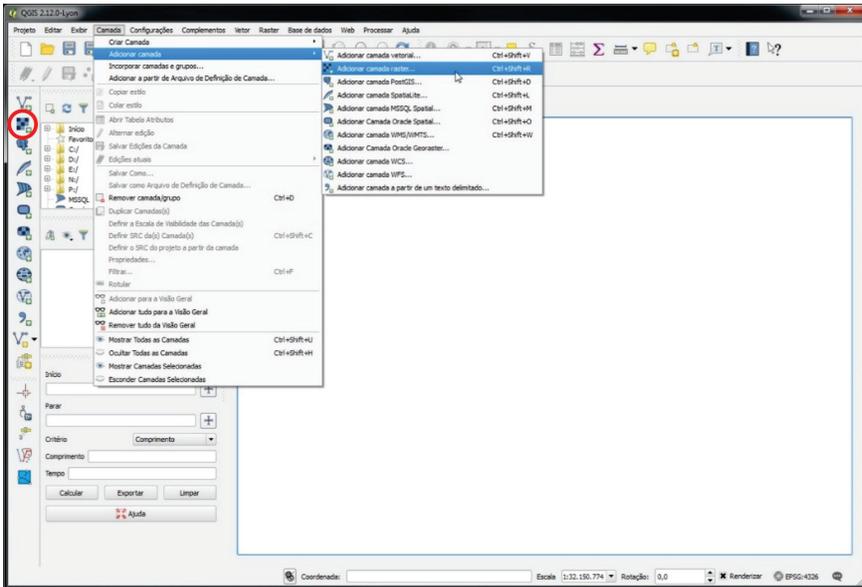


Figura 7.2. Seleção de comandos do menu principal para abrir a sub-janela de importação de arquivos em formato “ARC View/ GIS ASCII Raster Grid”.

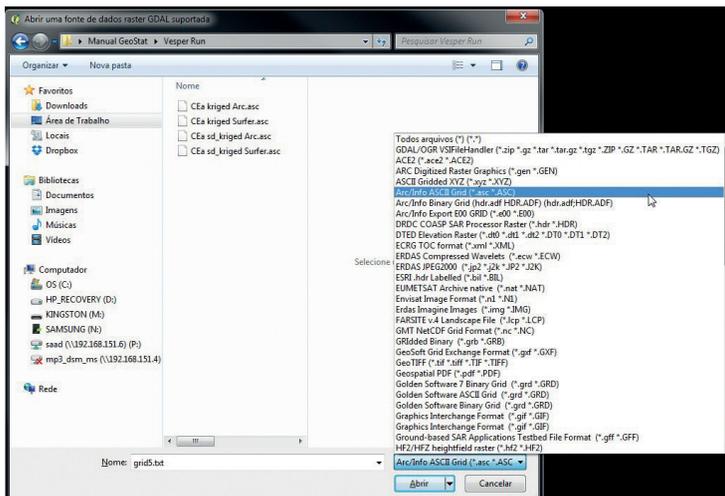


Figura 7.3. Sub-janela de importação direta de arquivos em formatos GDAL suportados que inclui o formato “ARC View/ GIS ASCII Raster Grid”.

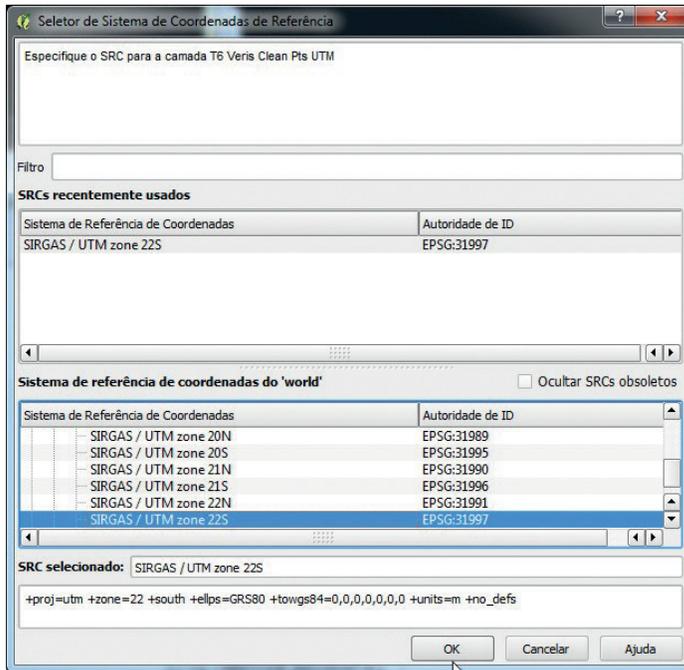


Figura 7.4. Sub-janela “Seleção de Sistema de Coordenadas de Referência” para definição dos parâmetros de georreferenciamento preciso do mapa sendo importado em ambiente SIG.

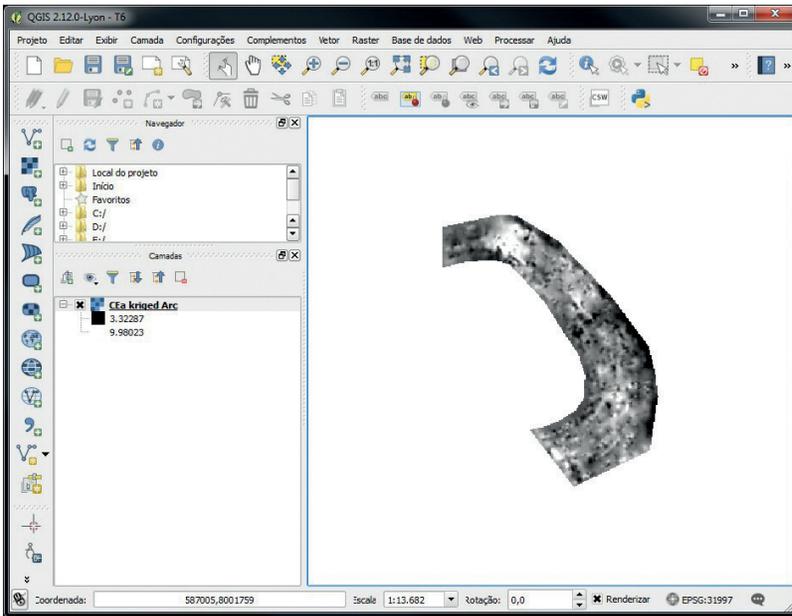
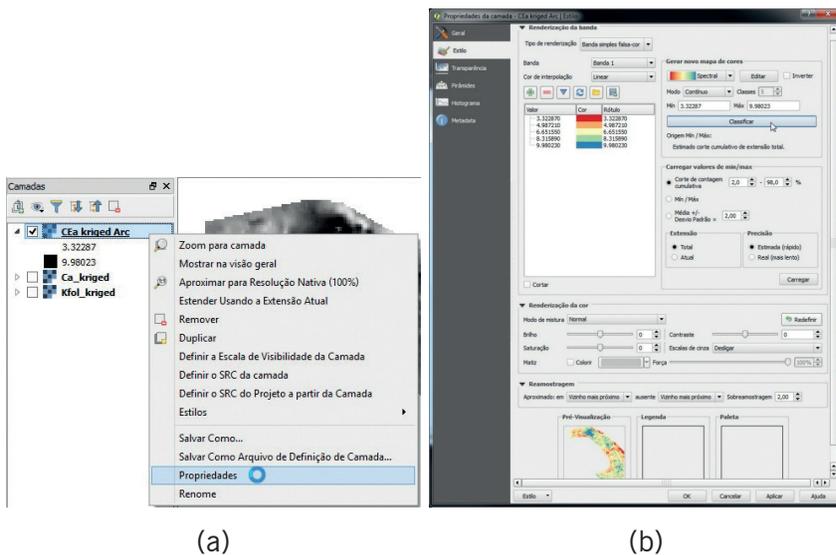


Figura 7.5. Mapa de CE_a importado no QGIS a partir dos mapas estimados no Vesper.



(a)

(b)

Figura 7.6. Procedimento de “Renderização da banda” do mapa importado com diferentes opções de legenda, selecionando: a) a sub-janela “Propriedades da Camada”; e b) a aba de “Estilo”.

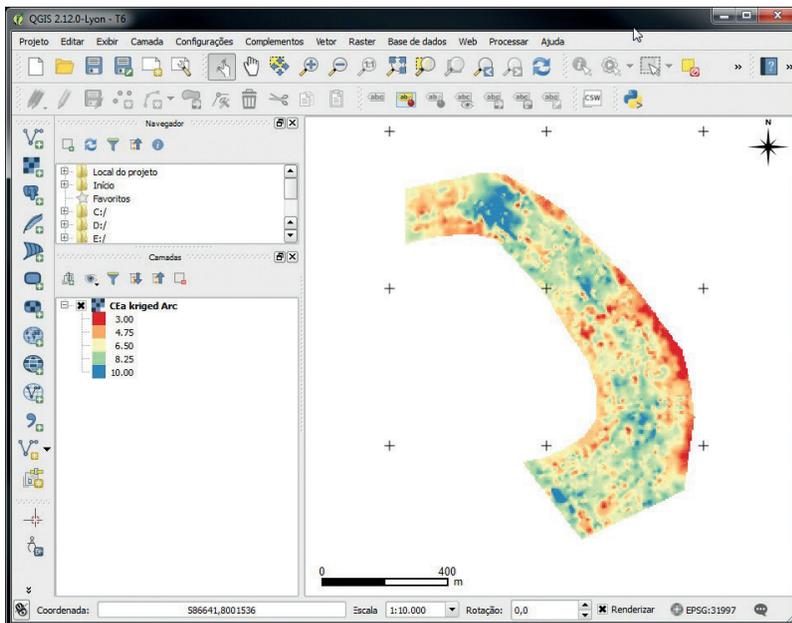


Figura 7.7. Mapa de CE_a renderizado como “Banda simples falsa-cor” e legenda de cores por interpolação linear em modo contínuo definindo 5 faixas de valores.

7.5 Importação de Texto Delimitado

A importação de arquivos de texto delimitado (e.g.: por vírgulas, por tabulações ou por espaços) pode ser diretamente realizada no menu de comandos de camadas do QGIS para diferentes formatos textuais (e.g.: “.csv”, “.txt” ou “.asc”). Esta interface oferece opções que atendem os diferentes tipos de delimitação textual criadas no Vesper para os resultados da krigagem, geração da grade de interpolação e geração do contorno da área considerada; bem como outros arquivos de texto contendo dados brutos de entrada gerados no monitoramento intensivo.

Visualização Georreferenciada dos Dados Brutos

Conforme anteriormente mencionado como opção para visualizar os dados de entrada (Item 2.5), detalhamos abaixo os procedimen-

tos para, a partir da barra de comandos na janela principal do QGIS, importar uma nova camada de dados georreferenciados.

1. Na opção **“Camada”** do menu principal de comandos, navegar até **“Adicionar camada”** e selecionar **“Adicionar camada a partir de um texto delimitado”** para abrir a sub-janela de importação de dados no formato de texto delimitado (Figura 7.8);
2. Na sub-janela de importação de dados **“Criar uma camada a partir de arquivo de texto delimitado”** (Figura 7.9), clicar no botão **“Procurar...”**, ao lado do campo **“Nome do Arquivo”** para abrir a sub-janela **“Escolha um arquivo de texto delimitado para abrir”** e selecionar a extensão e o nome do arquivo textual a ser importado (i.e.: **“.txt”**, **“.csv”**, **“.dat”**, ou **“.wkt”**). Observar no painel de visualização desta sub-janela a apresentação do conteúdo do arquivo sendo importado (Figura 7.10). Esta visualização permite subsidiar a seleção das opções de formato, registro, campo e geometria para definir a formatação correta do arquivo de texto (Figura 7.9);
3. Após as definições de formatação, especificar um nome para a camada a ser criada, certificar-se do formato correto do arquivo na área destinada a pré-visualização (Figura 7.9) e clicar em **“OK”**.

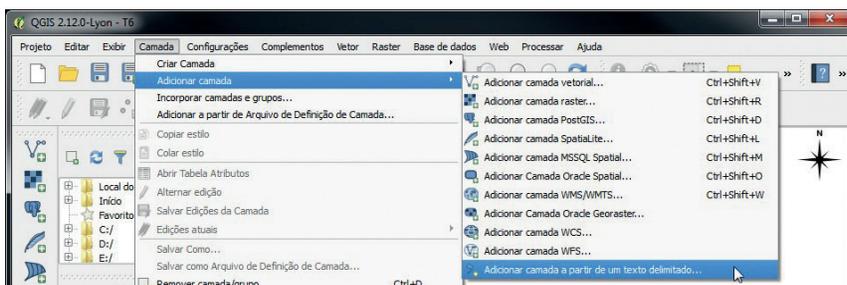


Figura 7.8. Seleção de comandos do menu principal para abrir a sub-janela de importação de arquivos em formato de texto delimitado.

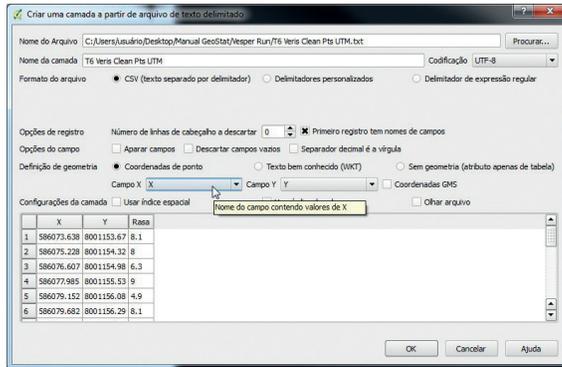


Figura 7.9. Sub-janela “Criar uma camada a partir de arquivo de texto delimitado” para formatação do texto na importação de um arquivo de texto.

Conforme discutido no Item 7.4, após clicar em “OK”, a sub-janela “Seletor de Sistema de Coordenadas de Referência” será automaticamente aberta. Passo onde é necessário definir o mesmo sistema de projeção cartográfica relacionada a área de estudo para se poder observar a superposição precisa das camadas de informação, no caso dos dados considerados como exemplo sendo: SIRGAS UTM 22S (Figura 7.4).

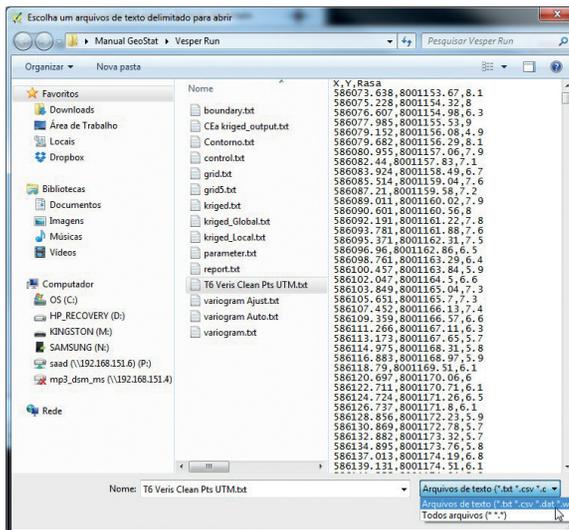


Figura 7.10. Sub-janela “Criar uma camada a partir de arquivo de texto delimitado” para definição do tipo de extensão e do arquivo de texto sendo importado em ambiente SIG.

Uma vez selecionado o sistema de georreferência, ou cancelada esta opção para uma importação sem definição de uma cartografia de referência, o mapa de pontos com a localização precisa dos locais observados no monitoramento intensivo aparecerá como uma nova camada no QGIS (Figura 7.11).

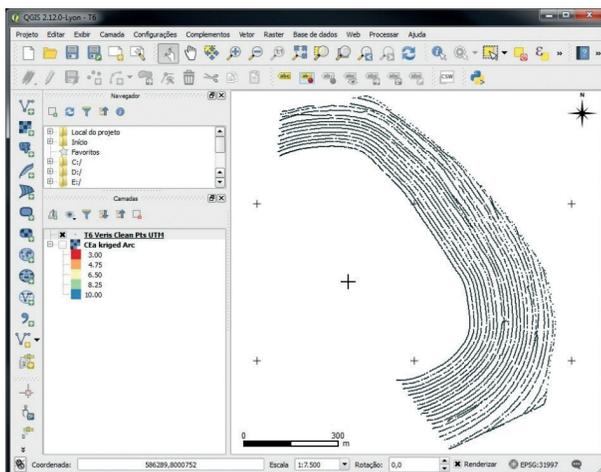


Figura 7.11. Mapa dos pontos de observação da CE_a , para visualização e validação da localização dos dados brutos gerados no monitoramento intensivo.

Importando o Contorno de Interpolação Criado no Vesper

Na aba de krigagem do Vesper é possível criar, de forma interativa, o contorno da área de krigagem que envolve os pontos de observação. Este mapa vetorial de contorno é gerado pelo Vesper como um arquivo de texto contendo os pares de coordenadas dos vértices do contorno delimitados por tabulação (Figura 7.12.a). No Vesper este arquivo serve para delimitar a grade regular de interpolação a ser gerada para definir a posição dos pontos a serem estimados na krigagem. Esta informação pode ser também importante na integração de dados no SIG, servindo de representação do perímetro da área de estudo ou de molde para corte de sub área de outras camadas de informação com extensão mais abrangente.

No QGIS, a importação do mapa de contorno gerado no Vesper é feita em duas etapas distintas. A primeira segue os procedimentos

detalhados acima descritos, importando o arquivo de contorno como um texto delimitado, conforme os passos para a **“Visualização Georreferenciada dos Dados Brutos”**. Após esta importação é necessário utilizar um complemento de software do QGIS denominado **“Points2One”**. Este complemento permitirá um processamento onde os pares de coordenadas dos vértices do contorno poderão ser conectados por arcos, definindo assim duas novas camadas vetoriais: um mapa de arcos interligados, compondo o perímetro da área, e um mapa poligonal preenchendo toda a extensão da área. Entretanto, este complemento exige que o arquivo texto com os pares de coordenadas tenham uma linha de cabeçalho identificando as variáveis e uma coluna indexadora adicional, definindo a sequência correta em que as coordenadas dos vértices devem ser conectadas (Figura 7.12.b). Para isto, o arquivo de contorno gerado no Vesper precisa ser editado, para satisfazer esta requisição antes do procedimento descrito abaixo ser implementado.

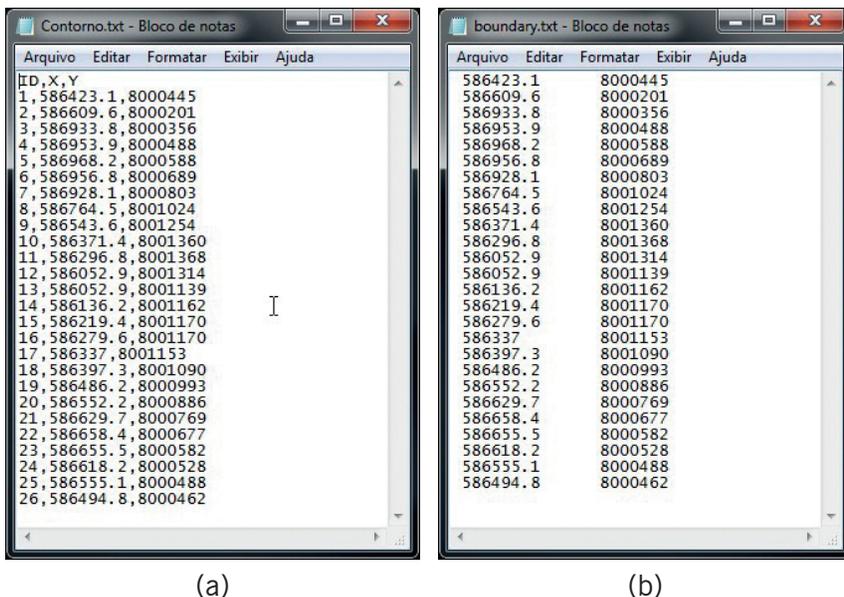


Figura 7.12. Diferença entre os arquivos de texto contendo os pares de coordenadas dos vértices que definem o contorno da área de estudo, sendo (a) formatação do arquivo gerado no Vesper com texto delimitado por tabulações; e (b) formatação requisitada pelo complemento do QGIS para o arquivo com cabeçalho, coluna de indexação e delimitado por vírgulas.

Inicialmente, repetem-se os passos descritos acima para o procedimento de visualização georreferenciada dos dados brutos, segundo as definições de opções ilustradas na Figura 7.13, para obtenção da camada de pontos representada na Figura 7.14.

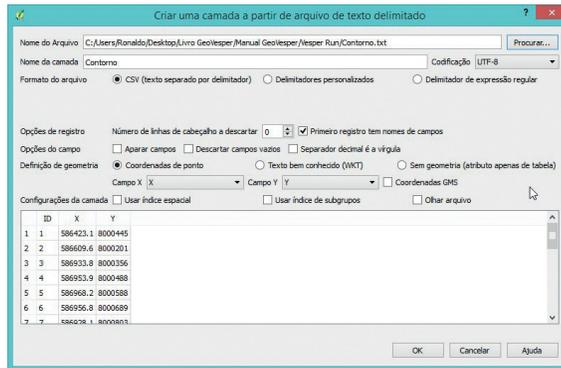


Figura 7.13. Sub-janela “Criar uma camada a partir de arquivo de texto delimitado” para formatação do arquivo texto na importação dos vértices do contorno da área de estudo.

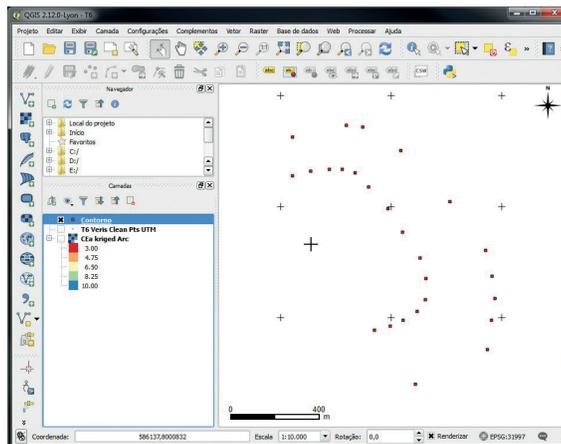


Figura 7.14. Mapa de pontos com os vértices do contorno da área definida no Vesper para krigagem. Resultado da importação de um arquivo de texto delimitado.

A conectividade entre os vértices do contorno definido no Vesper pode ser processada no QGIS para gerar um mapa vetorial de linhas,

delineando um limite de análise, ou de polígonos, definindo uma superfície sendo analisada. Estes processamentos encontram-se como opções de comando de um *plug-in* (i.e.: complemento de software) denominado “**Points2One**”. Este complemento se encontra livre para download, instalação e gerenciamento através da janela “**Complementos**”. Esta janela lista e disponibiliza as ferramentas de todos os repositórios conectados aos servidores *online* do QGIS. Para isto bastando estar conectado à Internet, para clicar sobre o nome do complemento desejado, e, em seguida, clicar no botão “**Instalar complemento**”. A janela “**Complementos**” (Figura 7.15) é ativada selecionando a aba “**Complementos**” do menu barra de ferramentas, e clicando na opção “**Gerenciar e Instalar Complementos**”. Uma vez a janela aberta, uma lista de complementos é listada por categoria: sendo: “**Tudo**”, “**Instalados**”, “**Não instalados**”, “**Atualizável**” e “**Opções**”.

O download, instalação e ativação do complemento “**Points2One**” para geração dos mapas de contorno e de superfície da área considerada seguem os seguintes passos:

1. Na aba “**Tudo**” (ou “**Não Instalado**”), utilizar a ferramenta de busca, campo “**Buscar**”, para digitar o nome do complemento. Conforme a digitação é feita, uma lista de nomes de funções afins é dinamicamente atualizada. Neste caso a palavra “Point” já será o suficiente para o plug-in desejado ser localizado;
2. Clicar em cima do nome do complemento, “**Points2One**”, e depois clicar no botão “**Instalar complemento**” (Figura 7.16.a);
3. Após a instalação ser finalizada, o complemento aparecerá listado nas categorias “**Tudo**” e “**Instalados**”; devendo estar com o seu “**box de seleção**” acionado (Figura 7.16.b) para permitir que a opção de comando “**Points2One**” apareça ativa na aba “**Vetor**” da barra de ferramentas (Figura 7.16.c);
4. A janela “**Points2One**” é ativada selecionando a aba “**Vetor**” do menu barra de ferramentas, e clicando na opção “**Points2One**” (Figura 7.16.c). Uma vez a janela “**Points2One**” aberta, várias de opções de comando ficam disponíveis para definir o formato e as características das camadas sendo geradas (Figura 7.17);
5. Para gerar um mapa de linhas com o contorno da área, as seguintes definições deverão ser feitas (Figura 7.17.a):

- a) Definir a camada de entrada com os pontos dos vértices do contorno;
 - b) Clicar em **“Create lines”**;
 - c) Definir um nome para o arquivo resultante no campo **“Shape file de saída”**; e
 - d) Ativar a opção **“Adicionar dados à tela”**, para permitir a visualização imediata da camada gerada após o processamento, e clicar em **“OK”**.
6. Para gerar um mapa de polígonos com a superfície da área, as seguintes definições deverão ser feitas (Figura 7.17.b):
- a) Definir a camada de entrada com os pontos dos vértices do contorno;
 - b) Clicar em **“Create polygons”**;
 - c) Definir um nome para o arquivo resultante no campo **“Shape file de saída”**; e
 - d) Ativar a opção **“Adicionar dados à tela”**, para permitir a visualização imediata da camada gerada após o processamento, e clicar em **“OK”**.

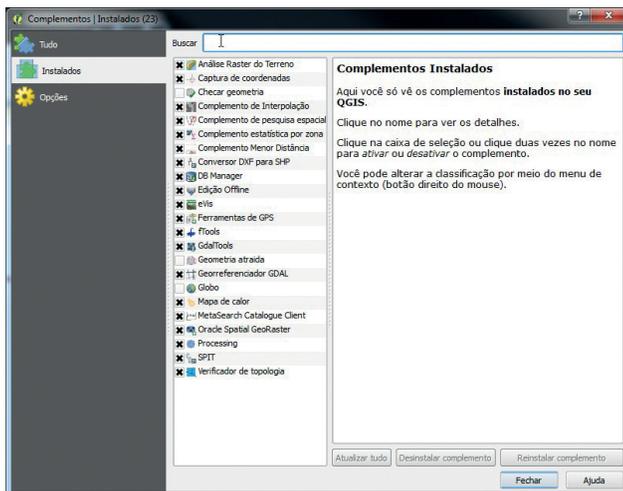
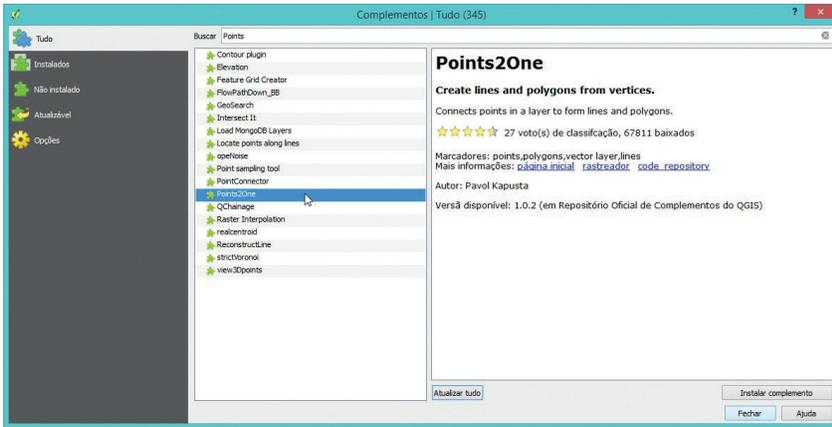


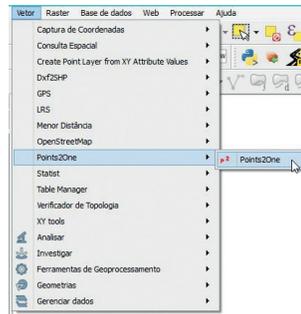
Figura 7.15. Interface para gerenciamento dos complementos instalados no QGIS para localização e instalação da extensão **“Points2One”** na sub-janela de complementos.



(a)

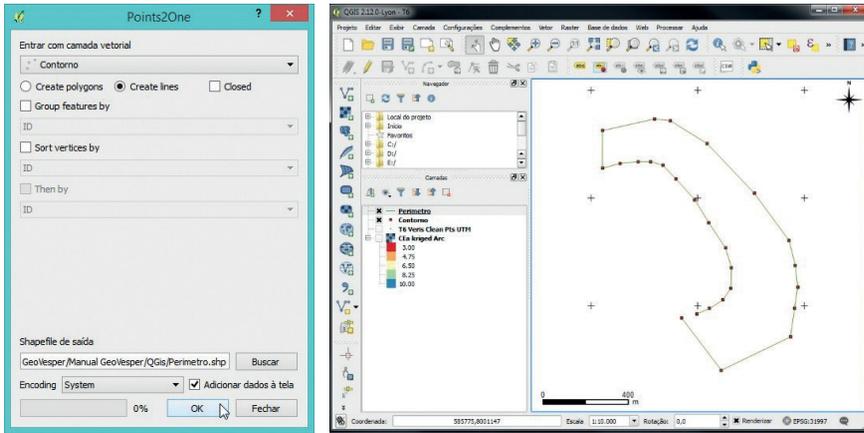


(b)

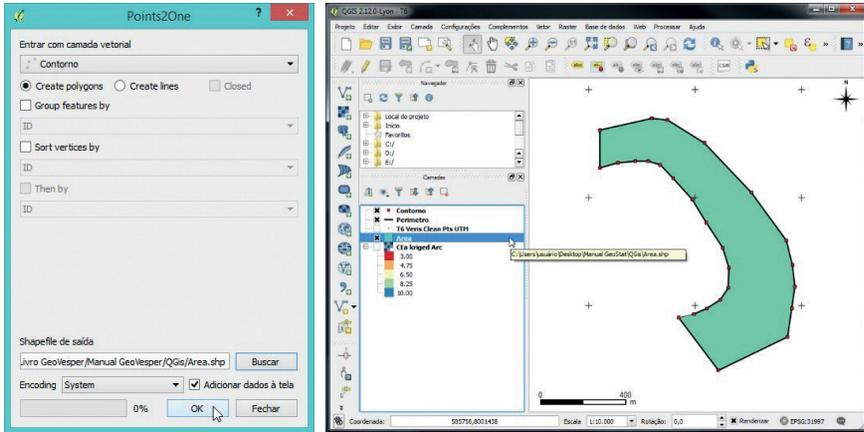


(c)

Figura 7.16. Seleção do complemento “Points2One” na aba “Vetor” do menu barra de ferramentas (em c), depois de selecionado e instalado na sub-janela “Complementos” (em a e b respectivamente).



(a)



(b)

Figura 7.17. Mapas vetoriais gerados a partir do arquivo de contorno de interpolação definido no Vesper com as coordenadas dos vértices do contorno da área de krigagem, sendo: a) perímetro linear; e b) área poligonal.

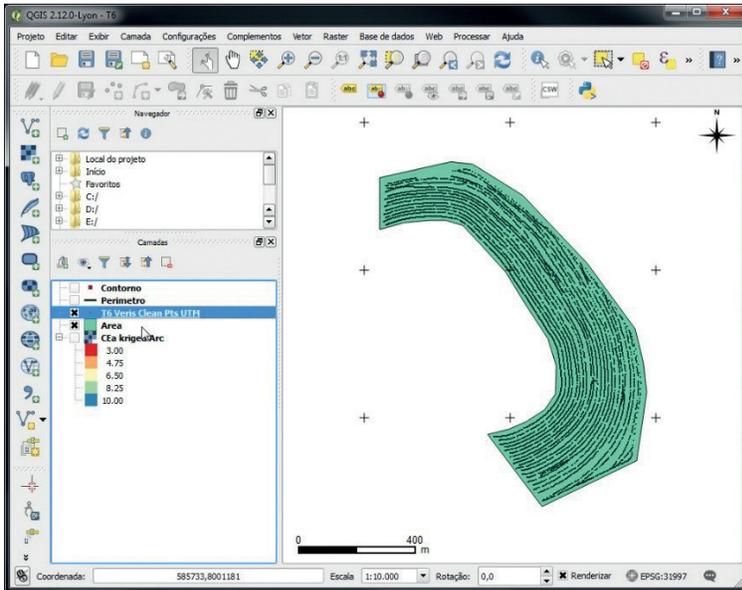


Figura 7.18. Superposição de mapas no QGIS, ilustrando os a localização dos dados brutos sobre a área gerada a partir do contorno de interpolação definido no Vesper.

Capítulo 8

Exemplos das Aplicações na AP

Ronaldo Pereira de Oliveira

8.1 As Funções da Geoestatística na Adoção da AP

Este capítulo exemplifica sumariamente as possíveis funções que a geoestatística pode assumir como ferramenta de apoio decisório durante o processo de adoção da AP. Como visto na Seção 1, este processo envolve uma integração dinâmica e abrangente entre tecnologias e ações de campo (Capítulo 1) e conhecimentos específicos (Capítulos 2 e 3) na gestão operacional e estratégica da produção. Este processo é cíclico e usa o georreferenciamento como base comum para etapas que podem ser definidas como: monitoramento intensivo, geração de mapas de atributos, planejamento e intervenção diferenciada. Etapas que se tornam mais acessíveis ao tomador de decisão com a disponibilidade de protocolos operacionais bem definidos e/ou aplicativos para análises semiautomáticas, como o Vesper se propõem a ser. O uso dos procedimentos disponíveis nas interfaces do Vesper (Seção 2) atendem funções diretamente ligadas as etapas de geração de mapas e planejamento das intervenções diferenciadas na fertilidade do solo ou no controle de pragas e plantas invasoras.

Os exemplos apresentados neste capítulo ilustram aplicações com dados gerados por duas abordagens frequentemente adotadas na produção de grãos em sistemas de plantio direto na região do Cerrado, sendo: a amostragem da fertilidade do solo por grade e o monitoramento em modo contínuo com sensores de CE_a . O objetivo é orientar o usuário do Vesper sobre como os procedimentos de variografia e krigagem descritos na Seção 2 se associam com as etapas do processo de adoção do manejo por sítio-específico. Em particular, tipificando o potencial da geoestatística como ferramenta básica nas práticas de manejo da fertilidade por taxas variadas. As considerações não envol-

vem a crítica agronômica aos resultados das análises geoestatísticas, buscando apenas ressaltar aspectos de ordem operacional relacionados as incertezas nos resultados quantitativos que estão associados as diferentes densidades amostrais dos dados de entrada. Ainda sob o aspecto do delineamento amostral do solo, este capítulo concluindo a Seção 3 e complementa o tópico de o que fazer “Depois do Vesper”, sugerindo uma potencial aplicação dos sensores de CEa em apoio a um delineamento amostral mais eficiente.

Destacam-se as seguintes funções da geoestatística no processo decisório:

- Avaliar a dependência espacial de uma variável dos fatores de produção
- Estimar valores desta variável para pontos de uma grade de locais não observados.
- Gerar mapas dos diferentes fatores de produção sobre uma grade comum de interpolação, possibilitando o uso de camadas de informação para análise espacial multivariada em SIG.
- Delinear esquemas amostrais e MZs em função da variabilidade espacial estimada.

8.2 Monitoramento Intensivo na Produção de Grãos

Os dados e os mapas apresentados em toda a extensão do livro são de uma área de produção de grãos, em região de Cerrado, que se encontra em fase inicial da adoção da AP. São resultados de um estudo no qual, além das questões agronômicas centrais, foram discutidos os aspectos quantitativos da geoestatística aplicada na caracterização da variabilidade espaço-temporal dos atributos de solos para fins do manejo de insumos por taxas variadas em um sistema de produção com fertilidade construída. A área, denominada de Talhão 6 (T6), fica localizada na Fazenda Cruzeiro do Sul, no município de Castelândia, sudoeste goiano (Figura 8.1). Os dados de monitoramentos intensivos foram coletados utilizando duas abordagens típicas no processo de adoção da AP no Brasil. Os dados monitorados no período entre as safras de 2009 e 2011 faz parte de 15 experimentos da Rede AP em áreas de produção comercial de culturas anuais e perenes.

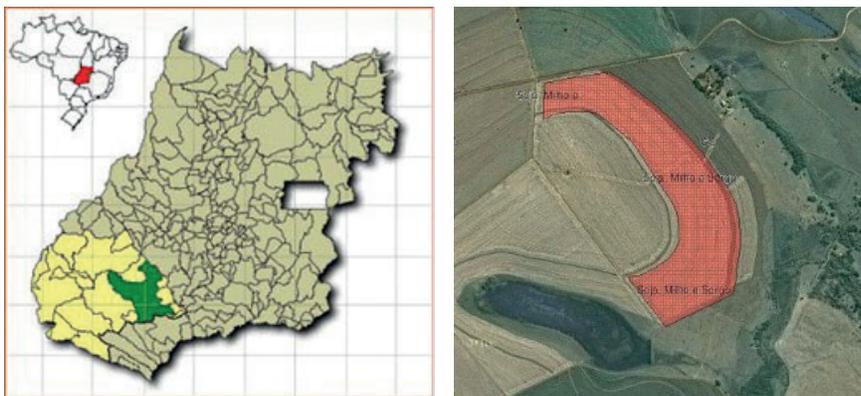


Figura 8.1. Mapa de localização do talhão de estudo, no Município de Castelândia, GO, e superposição da malha de interpolação sobre a imagem de satélite da fazenda.

O talhão tem 35 ha de extensão sob produção de grãos em sistema de plantio direto com rotação das culturas de soja, milho e sorgo. O solo predominante é um Latossolo Vermelho distroférico desenvolvido sobre material basáltico da formação Serra Geral, as margens do Rio dos Bois e com altitude média de 455 m.

As etapas de adoção da AP neste talhão envolveram o monitoramento intensivo do solo mediante diferentes abordagens operacionais dados gerados em diferentes densidades amostrais, sendo: a) a amostragem de solos por grade em malha de uma amostra por hectare (35 observações, Figura 8.2.a); e b) o monitoramento intensivo das medidas de CE_p (7.480 observações, Figura 8.2.b). Amostras por grade foram coletadas após a colheita da safrinha, na profundidade de 0 a 20 cm, com uso de um amostrador de rosca motorizado de uma polegada; sendo cada amostra formada por 10 subamostras tomadas em um raio de 20 metros a partir dos pontos da malha georeferenciada com espaçamento de 100 m. Isto resulta em valores absolutos de atributos determinados em laboratório e associados a uma observação georeferenciada e representativa para uma área de 100 X 100 m (i.e.: 1 ponto por hectare). As determinações analíticas foram realizadas nos laboratórios de solo da Universidade de Rio Verde. O monitoramento georreferenciado das medidas de CE_p foi realizado utilizando a tecnologia em rastreamento contínuo por contato nas profundidades de 30 cm e 90 cm com a tecno-

logia Veris 3100 (Veris Technologies®) segundo implementações físicas e características de operação descritas em Rabello et al. (2008).

O pré-processamento considerou a transformação de coordenadas geográficas para o sistema de projeção UTM, descrita no Item 7.4, e a análise de distribuição dos dados dos atributos de fertilidade do solo determinados em laboratório, como demonstrado no Item 2.1. Os procedimentos de krigagem ordinária (itens 3.6) foram realizados para estimativas por blocos de 10 m² e raio de busca proporcional a maior distância entre as observações, gerando mapas com valores dos atributos estimados para todos os pontos da grade de interpolação com um intervalo de 5 m (em detalhe na Figura 8.2.c), derivando um mapa com a informação complementar sobre os valores do erro associado as estimativas em cada ponto da grade.

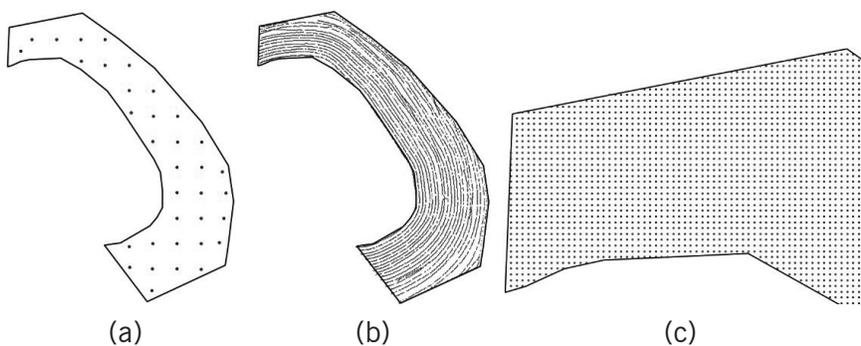


Figura 8.2. Distribuição espacial e densidade amostral dos dados monitorados e resolução das estimativas da krigagem, respectivamente: a) grade amostral com 1 ponto por hectare, b) monitoramento contínuo de CEa; e c) grade de interpolação de 5 x 5 m.

8.3 Dependência Espacial da Fertilidade do Solo

Um das aplicações práticas dos procedimentos de variografia descritos no Capítulo 5 é a análise preliminar da dependência espacial dos diferentes atributos sendo analisados, antes mesmo dos parâmetros calculados serem usados para fins da geração de mapas por krigagem. Entre outros parâmetros indicativos no cálculo e ajuste dos variogramas, a distância a partir da qual a variância se estabiliza num

patamar (a_1) define a autocorrelação espacial de cada um dos atributos analisados. Ou seja, a distância a partir da qual espera-se que as observações feitas para um atributo específico (e.g.: macro ou micro nutriente) em dois pontos distintos deixem de ter valores correlacionados (i.e.: medidas relativamente iguais).

A Tabela 8.1 apresenta os parâmetros de ajuste dos variogramas para os diferentes atributos observados, e indica as respectivas estimativas da dependência espacial calculada em função do coeficiente de alcance relativo a função de covariância (i.e.: modelo teórico) ajustada. Nesta tabela é possível observar as diferentes dimensões de variação dos vários atributos. Estes valores por si já indicam as distâncias a partir das quais já se poderia considerar o manejo diferenciado daquele atributo específico. Como por exemplo, a aplicação de potássio por taxas variadas com dosagens visando um aumento no estoque de K em partes de um talhão sob sistema de produção intensiva com fertilidade construída. Entretanto temos que considerar que estas distâncias foram estimadas em função do espaçamento amostral dos dados utilizados no cálculo do variograma empírico, neste caso particular uma malha amostral de 100 x 100 m. Em outras palavras, não se pode esperar definir a dependência espacial de uma dada variável numa dimensão menor do que o seu espaçamento amostral. Apesar de sabermos que a dependência espacial de uma variável possa existir em diferentes escalas de correlação, dependendo dos parâmetros de referência definidos para o cálculo do variograma (descritos no “Procedimento de Ajuste em Modo Global” - Item 5.1), este pressuposto não garante porém, que se possa determinar uma menor distância de dependência espacial apenas por refinar o espaçamento amostral. O que pode ser entendido na relação entre os conceitos de estacionaridade e escala amostral ilustrada na Figura 3.7 (apresentada em “Tendência” - Item 3.4).

Atributo do Solo	Ano	Modelo de Ajuste	C0*	C1**	a1***	Distância de Correlação (m)
Argila	2009	Esférico	0,0	24,38	119,8	118
Areia	2009	Duplo Exponencial	0,0001	15,25	51,0	150
pH	2010	Esférico	0,021	0,01	536,4	530
Potássio	2009	Esférico	0,0	5625,6	286,7	280
	2010	Duplo Esférico	0,0	8174,9	352,8	350
Fósforo	2009	Esférico	0,274	7,095	183,5	180
	2010	Esférico	11,46	63,67	180,8	180
Ca	2009	Esférico	0,301	0,419	294,0	235
	2010	Esférico	0,173	0,554	339,0	335
Mg	2009	Esférico	0,007	0,012	297,0	295
	2010	Esférico	0,0006	0,076	212,3	200
M.O.	2009	Esférico	4,522	34,2	199,4	195
CE _a	2010	Exponencial	4,948	1,832	62,5	187

*C0 = efeito pepita; **C1 = variância estrutural; ***a1 = alcance.

Tabela 8.1 Parâmetros dos ajustes do variogramas de atributos de solo e a dependência espacial estimada pela distância de correlação entre pontos medidos em locais diferentes.

Por isto, antes de definir a grade amostral que vai alimentar os procedimentos da geoestatística, as características inerentes ao processo sendo analisado e a escala de dependência espacial para a qual se pretende representar as variações dos atributos devem ser observadas. Isto é, se o espaçamento definido entre os pontos observados permite caracterizar a estrutura espacial de variações do atributo sendo analisado na escala em que se pretende delinear áreas consideradas homogêneas. Estes fatores se não adequadamente ajustados comprometem diretamente a precisão e a robustez estatística do ajuste do variograma, conseqüentemente também afetando a qualidade dos mapas krigados.

Como os resultados das análises destas relações espaciais são fortemente influenciadas pela escala e densidade amostral das observações de campo, a relevância do uso das técnicas de geoestatística devem ser cautelosamente avaliadas nos procedimentos de ajuste do variograma (Item 5.1) sob a perspectiva de conhecimento do processo físico-químico sendo analisado. De forma geral, os processos de solos e outros relacionados as variações da produtividade (e.g.: reboleiras, nematoides, cigarrinhas, ervas daninhas, entre outros) apresentam as seguintes características de variação espacial:

- São fenômenos que ocorrem de maneira localizada e se espalham lentamente pelo campo.

- Apresentam variáveis com distribuição log normal (i.e.: uma maioria de valores baixos com poucos valores extremamente baixos) e variogramas errôneos (i.e.: efeito pepita e variância extremamente altos)

8.4 Mapas Estimados por Krigagem

Um das práticas mais comuns na adoção da AP no Brasil que está diretamente relacionada ao uso das técnicas de geoestatística é a abordagem de coleta de amostras de fertilidade do solo seguindo um esquema amostral de observações feitas em locais determinados por uma grade regular de pontos georreferenciados (BERNARDI; INAMASU, 2014). Nesta aplicação o uso dos procedimentos descritos no Capítulo 6 tem a função de gerar mapas por krigagem utilizando os parâmetros de ajuste do variograma obtidos na avaliação da dependência espacial de uma variável. Os mapas de atributos podem ser gerados para vários atributos dos fatores condicionantes da produção (e.g.: solo, planta e/ou infestações) bem como para fatores relativos ao impacto ambiental da atividade (e.g.: contaminação do solo por metais pesados ou lençol freático por lixiviação de insumos).

O acervo de dados gerados pelas observações por grade amostral do solo no talhão T6 possibilitou a krigagem de atributos de fertilidade. Os arquivos resultantes da krigagem contêm valores estimados a partir das observações da vizinhança dos pontos de interseção da grade de interpolação com resolução de cinco metros (i.e.: locais não observados). Após o procedimento de importação em SIG (Item 7.4), estes arquivos são convertidos no formato *raster* onde os valores estimados nos pontos de interseção são associados a quadrículas de 5 m² de uma malha contínua (Figura 8.3). Este tipo de análise individualizada da variação espacial de um atributo selecionado é o uso primário dos resultados da krigagem, sendo uma abordagem muito difundida pelos serviços de consultoria em AP para aplicação de KCI por taxas variadas. A observação destes mapas permite identificar os locais com maior ou menor concentração de um elemento dentro do talhão, viabilizando um planejamento de aplicação de insumos segundo demandas locais específicas.

Um subproduto viável com estes resultados é a geração de mapas de predição de custo destas intervenções, calculando o custo da

aplicação por taxas variadas e/ou a economia potencial em relação ao manejo clássico⁸ para cada área diferenciada dentro do talhão. Estes mapas permitem calcular com precisão as áreas definidas pela classificação dos valores krigados em diferentes faixas de recomendação agronômica. Entretanto, esta abordagem foca em soluções mais imediatistas e sem o entendimento aprofundado das possíveis interpretações dos resultados. Neste sentido, deve-se observar que o conhecimento praticado por associações de produtores de AP⁹ em avançado estágio de adoção da tecnologia (i.e.: mais de 10 anos de monitoramento intensivo de diversos fatores de produção) descarta este tipo de análise individualizada nas fases iniciais da adoção, sugerindo um acervo de dados de no mínimo três safras antes formar uma opinião conclusiva sobre um planejamento amplo e integrado e do manejo das variações da produtividade.

Estes procedimentos não são exclusivamente aplicados a dados observados por grade amostral, e obviamente podem gerar krigagens mais precisas quando alimentados com dados do monitoramento em modo contínuo utilizando sensores proximais de atributos de solo. Os quais podem ser também utilizados para melhorar as estimativas através da técnica de co-krigagem para atributos fortemente correlacionados em seus valores observados.

8 Recomendações de calagem e adubação com taxa de aplicação uniforme que é calculada pelo teor médio de nutrientes observados em um número limitado de amostras compostas.

9 Por exemplo a Society of Precision Agriculture Australia - SPAA (<http://www.spaa.com.au/>)

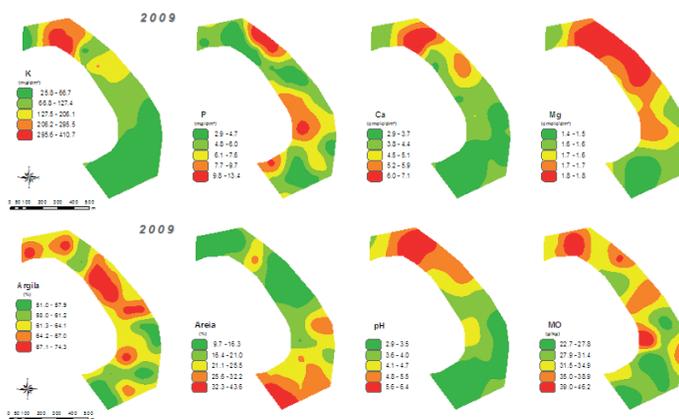


Figura 8.3. Exemplos da variabilidade espacial de diferentes atributos de fertilidade do solo na safra de 2009, com mapas obtidos pela krigagem da grade amostral de 1 ponto por hectare.

Ainda considerando o monitoramento por grade amostral, os atributos indicados como de maior influência nas variações da produtividade de uma safra podem ser repetidos em safras subsequentes, preferencialmente, obedecendo as mesmas malhas de entrada (i.e.: grade amostral) e saída (i.e. grade de interpolação). Os mapas estimados para safras subsequentes mostram as variações espaço-temporais dos atributos considerados (Figura 8.4).

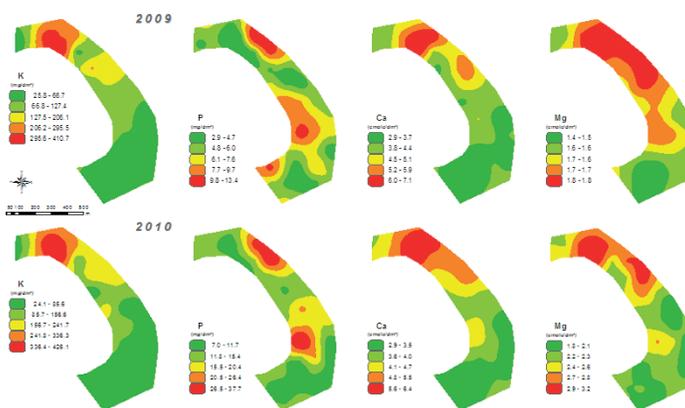


Figura 8.4. Mapas krigados possibilitando a análise da variabilidade espaço-temporal de atributos de fertilidade considerados na definição do manejo diferenciado de insumos.

Outra abordagem a ser explorada com os resultados da krigagem é a análise multivariada dos dados para determinação dos fatores que mais influenciaram nas variações observadas no mapa de produtividade de uma safra específica. Esta vale-se do fato em que todas as propriedades monitoradas na safra são usualmente estimadas para todos os pontos de uma grade de predição única cobrindo toda a extensão do talhão (Figura 8.2.c). Este denso conjunto de dados em alta densidade viabiliza o uso de regressões multivariadas que podem indicar a forte correlação dos fatores de produção que potencialmente estão influenciando positivamente, considerando as áreas dentro do talhão com maior produtividade, ou negativamente nas áreas de menor produtividade. Adicionalmente, outras técnicas de análise multivariada permitem a integração das contribuições das variações individuais dos mapas de atributos em um único plano de informação que serve para alimentar algoritmos de segmentação de imagens capazes de simular o delineamento de MZs para o manejo por sítio-específico (OLIVEIRA, 2009).

8.5 Monitoramento da Condutividade Elétrica

Informações geradas a partir de plataformas multissensores para o monitoramento intensivo na AP podem indicar com mais precisão uma intervenção de campo mais eficiente. Estas são mais facilmente sintetizadas por parâmetros do variograma devido a massiva disponibilidade de pontos observados em modo contínuo, ou como referido mundialmente “*on the go*” (i.e.: “durante o caminhamento” ou “em tempo real”). Para esta abordagem, equipamentos de vários formatos, já estão acessíveis no mercado e disponíveis como parte da consultoria agrônômica especializada. No Vesper, tanto os procedimentos de ajuste automático do variograma em modo local (Item 5.1) quanto as opções de krigagem ordinária por blocos (Item 6.4) são orientados e disponibilizados para estes tipos de dados de entrada. Desta forma simplificando bastante algumas etapas durante o processo de adoção da AP, em particular no que tange ao apoio em decisões operacionais (i.e.: definição do esquema amostral, geração de mapas de atributos e indicação dos fatores de produção que apresentam as estruturas de variação espacial mais correlacionadas com as variações observadas nos mapas de produtividade.

Um exemplo desse tipo de serviço que é muito difundido no mercado da AP usa o monitoramento da CE_a em alta resolução espacial, utilizando condutivímetros conectados a um GNSS (Item 1.2). Esta tecnologia vem se mostrando bastante eficaz no processo de adoção da AP, servindo como uma camada de informação básica, que traz em sua autocorrelação espacial uma indicação significativa da estrutura da variação de propriedades físicas e químicas correlacionadas a este atributo e que influenciam diretamente a variação da produtividade (MCBRATNEY et al., 2005; SUDDUTH et al., 2003). A Figura 8.5 ilustra a alta correlação espacial observada por sensores de monitoramento intensivo em modo contínuo no talhão T6. Estes dados demonstram também o potencial desses sensores em indicar efeitos sazonais durante uma safra, seja na viabilidade de intervenções recursivas, como no caso dos sensores não invasivos, ou na caracterização das condições de referência da safra, isto é da condição da fertilidade do solo pré-plantio e o resultado da safra na colheita. Entre os sensores não invasivos podemos destacar os sensores ópticos de cultivo por infravermelho, que indicam as requisições de aplicação de nitrogênio e podem ser usados em diferentes momentos durante a safra (e.g.: Crop Circle). Um exemplo de como os mapas de CE_a gerados em duas profundidades no início da safra (i.e.: 30 e 90 cm) podem apresentar uma boa correlação com a estrutura de variação espacial observadas no mapa de colheita (i.e.: $r^2 = 0,53$ e $0,65$ respectivamente) é apresentado na Figura 8.5. É possível observar que áreas com formatos relativamente similares em locais de baixa CE_a correspondem aos locais de baixa produtividade, principalmente na ponta a noroeste e na área centro-sul do talhão. Vale ressaltar que na experiência com a modelagem multivariada em AP, as correlações espaciais entre mapas de atributos não indicam em geral valores significativos se relativizados a correlações puramente numéricas, raramente correlacionando mais de 75% da informação (i.e.: em geral $r^2 \leq 0,75$). Fato possivelmente explicado pela diferente natureza das fontes de dados e da estrutura e intensidade da variabilidade espacial dos processos que elas representam.

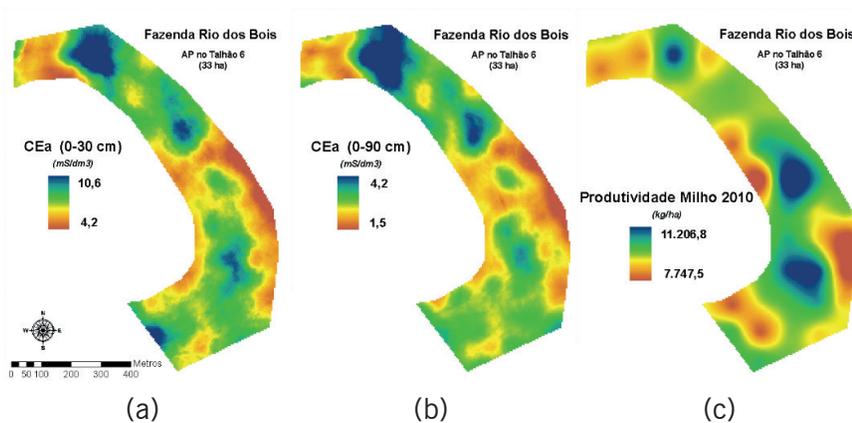


Figura 8.5. Correlação entre as estruturas de variação espacial dos dados de CE_a , observados no início da safra em duas profundidades (a e b), e da produtividade na colheita (c).

8.6 Estimativas com Diferentes Densidades Amostrais

A natureza do Vesper coloca a questão do erro nas estimativas da interpolação, apresentando um mapa de erro derivado da krigagem. Fato que é reiterado no nome do aplicativo (i.e.: “with Error”) e na sub-janela dos resultados da krigagem, que inclui o mapa com os valores do desvio padrão na estimativa de cada ponto da grade de interpolação (Figura 8.6). Este aspecto foi concebido, enquanto aplicativo de produção, com o intuito de agilizar e facilitar o processamento de dados observados em alta densidade amostral, em geral coletados em modo contínuo. Assim se propondo a ter uma função intermediária, na automação do fluxo de dados, e facilitadora em estágios iniciais na adoção da AP; quando o domínio dos conceitos e das técnicas da estatística espacial ainda é limitado.

Não que o Vesper coloque restrições na análise com dados em baixa densidade amostral, o que é facilmente possível com a opção de ajuste do variograma em modo global na sub-janela “**Variogram Model**” (Figura 5.3), mas sua interface visa facilitar os procedimentos da krigagem com ajuste de variogramas em modo local (Item 5.1). De uma maneira interativa, o ajuste em modo global (i.e.: menu de opções “**Fitting Control Panel**”) também facilita o refinamento manual

dos parâmetros de ajuste automáticos dos nove modelos teóricos pre-definidos e indica coeficientes do erro do ajuste, porém não disponibiliza recursos necessários ao ajuste manual generalizado (e.g.: definição ou acesso a outros modelos teóricos) ou mesmo acesso a métodos de validação mais robustos (e.g.: “*Jack-knifing*”).

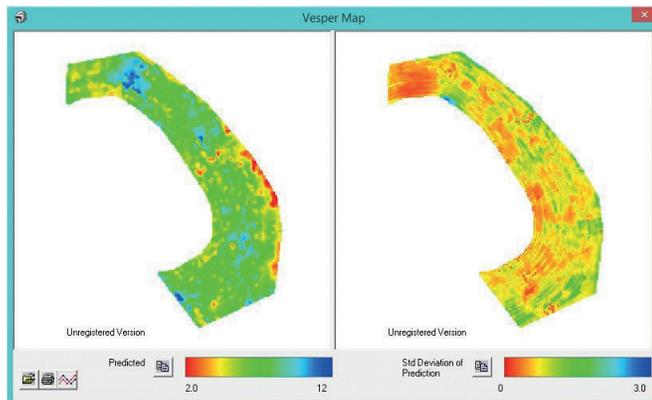


Figura 8.6. Sub-janela de resultados da krigagem, ilustrando o mapa estimado e o mapa do erro associado a predição.

Dentro deste foco, torna-se ainda mais importante para os usuários do Vesper executando o ajuste do variograma com número limitado de pontos a cuidadosa verificação da estatística descritiva na análise exploratória dos dados de entrada (Capítulo 2) e a crítica aos resultados da variografia e da krigagem. Por este motivo, apresentamos resultados típicos para dados de entrada em baixa e alta densidade amostral orientando a crítica aos mapas resultantes da krigagem. Esta explanação vai de contraposto a práticas comuns do mercado de serviços em AP, onde o monitoramento do solo incide em geral na exaustiva e custosa abordagem de grades amostrais. Abordagem que naturalmente induz a uma questão que se tornou latente, talvez mais do que relevante, na adoção de AP no Brasil, sendo: “*Quantos pontos eu preciso coletar para gerar um mapa de atributos de solo por krigagem?*”. Esta pergunta posta como uma “*receita de bolo*” se assemelha ao clássico exemplo da questão “*Com quantos paus se faz uma canoa*”, onde talvez seja mais relevante perguntar primeiro: qual o tamanho (i.e.: o que vou transportar), o propósito (i.e.: atravessar um rio ou um oceano) e a robustez (i.e.: os requisitos mínimos de se-

gurança) da canoa que se pretende construir. De maneira similar a esta analogia e sob os conceitos discutidos no Item 8.3, a amostragem por grade orientada aos procedimentos de krigagem para AP precisam ser dimensionadas segundo: as características intrínsecas ao fenômeno sendo modelado; as dimensões das MZs nas quais que se pretende trabalhar; e o grau de incerteza aceito. Será a definição destes preceitos de amostragem por grade é que vão determinar o limite mínimo de pontos a ser considerado, abaixo do qual o ajuste do variogram, quando possível, terá base numa estatística pouco significativa, promovendo um alto grau de incerteza no conseqüente resultado da krigagem.

Os resultados das krigagens com dados em alta (i.e.: CE_p) e baixa densidade (i.e.: atributos de fertilidade do solo) são apresentados como forma de ilustrar a interpretação dos mapas de erro obtidos com diferentes densidades amostrais. Para os dados coletados por grade amostral foi possível gerar mapas por krigagem para os atributos chave do estudo agrônômico, apesar de requisitar ajustes manuais laboriosos, em modo global, ou mesmo impossibilitar a caracterização da dependência espacial de alguns atributos. Estes resultados indicam que não só um limitado número de pontos, mas principalmente a distribuição espacial regular das observações em relação ao formato radial do talhão T6, não favoreceram a representação da estrutura de variação espacial do solo. Este comprometimento entre a densidade amostral desejada e uma melhor distribuição dos pontos (i.e.: melhor cobertura junto as bordas irregulares do talhão) é um fato consagrado na geração automática de grades amostrais em AP (SPEKKEN; MOLIN, 2012). A análise dos variogramas indicaram que a quantidade (i.e.: 35 pontos) e a distribuição (i.e.: grade regular) do esquema amostral praticado ficou no limite mínimo do aceitável para permitir uma representação significativa das variações da maioria dos atributos, requisitando ajustes manuais difíceis e condicionados (e.g.: Potássio, pH, Fósforo, Cálcio e Magnésio), ou mesmo insuficiente para alguns ajustes (e.g.: Zinco, Nitrogênio, Cobre e Manganês) e inviabilizando o procedimento de krigagem.

A Figura 8.7 ilustra alguns resultados das simulações com ajustes manuais condicionados pelo espaçamento e a distribuição espacial da grade amostral praticada. O espaçamento de 100 X 100 m parece

não ter atendido a escala de variação para todas variáveis. Isto pode ser observado em analogia com as estruturas de variação espacial como apresentadas em Camargo et al. (2004), como apresentado no Item 3.4 (Figura 3.8). Estes comportamentos foram observados para pH (Figura 8.7.a) e Potássio (Figura 8.7.b) apresentando componentes aleatórios espacialmente correlacionados em diferentes distâncias máximas entre os pares e com diferentes qualidades dos ajustes, respectivamente, baixa variância em até 600 m e alta variância em até 420 m. Apesar da convergência no ajuste destes dois atributos (i.e.: mensagem **“Solution converged”** na interface), suas krigagens irão produzir mapas com diferentes níveis de erro nas estimativas, consequentemente gerando um mapa de Potássio muito mais incerto que o mapa de pH. Apesar da regressão ter convergido para um patamar no ajuste automático do Potássio, é possível observar valores muito altos para o efeito pepita e a amplitude da variância, além dos valores extremos dos coeficientes de validação e um limitado número de pares no cálculo do variograma (i.e.: entre 13 e 78 pares). Já no caso do Zinco, a regressão alcança um valor máximo sem definir um patamar de ajuste (i.e.: mensagem **“Interaction has reached maximum”** na interface) na escala da grade amostral (Figura 8.7.c), o que pode indicar um processo não estacionário, ou converge para um ruído aleatório em distâncias menores (Figura 8.7.d).

Podemos observar como a limitada disponibilidade de pontos observados dificulta, ou mesmo impossibilita, uma variografia bem ajustada conforme discutido nos itens 3.3 e 3.4. A baixa disponibilidade de observações limita o número de pares, principalmente em **“lags”** de menores distâncias, gerando parâmetros menos precisos da dependência espacial. Isto afeta diretamente os resultados da interpolação, sendo possível observar nestes casos que a krigagem só apresenta bom desempenho na vizinhança imediata dos pontos observados (Figura 8.8). No Vesper, este erro pode ser observado por intermédio do mapa apresentado na janela de visualização dos resultados da krigagem, onde em cada ponto da grade de interpolação as estimativas mais precisas são representadas em tons do vermelho ao amarelo e as menos precisas em tons do verde ao azul. Esta informação possibilita uma visualização das partes do talhão onde as estimativas estão tendo maior ou menor confiabilidade.

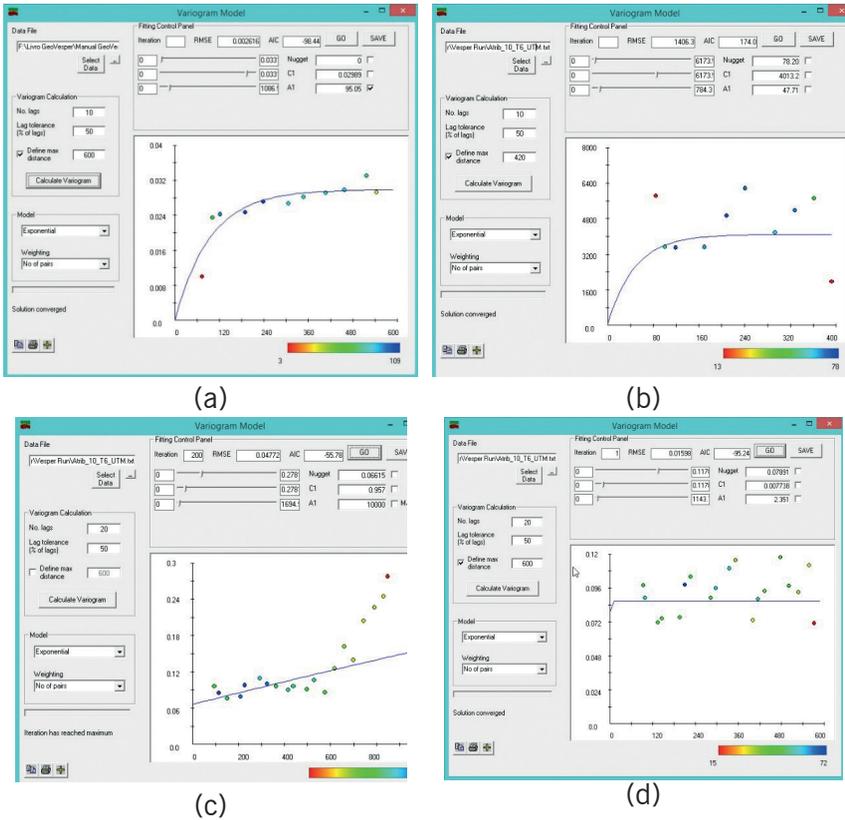


Figura 8. 7. Resultados típicos de ajustes manuais condicionados, indicando em diferentes escalas de variação: componentes espacialmente correlacionados para pH (em a) e Potássio (em b); e um componente correlacionado com tendência (em c) ou aleatório (em d) para diferentes escalas da dependência espacial do Zinco.

Estas observações reiteram a importância do esquema amostral nas análises geoestatísticas. Questão esta que pode ser considerada dentro de dois critérios básicos nas aplicações da AP, sendo:

- Uma amostragem adequada ao tamanho das áreas que se pretende caracterizar. Isto é, uma estimativa que considere as dimensões das áreas homogêneas para um determinado processo de fertilidade do solo ou para um planejamento operacional segundo a disponibilidade de implementos agrícolas. Nestes casos, o espaçamento entre amostras deverá ser menor do que as “manchas” sendo consideradas; ou

- Uma amostragem inteligente, onde se faz uso da variabilidade de variáveis indicativas para avaliar e estimar a densidade amostral adequada.

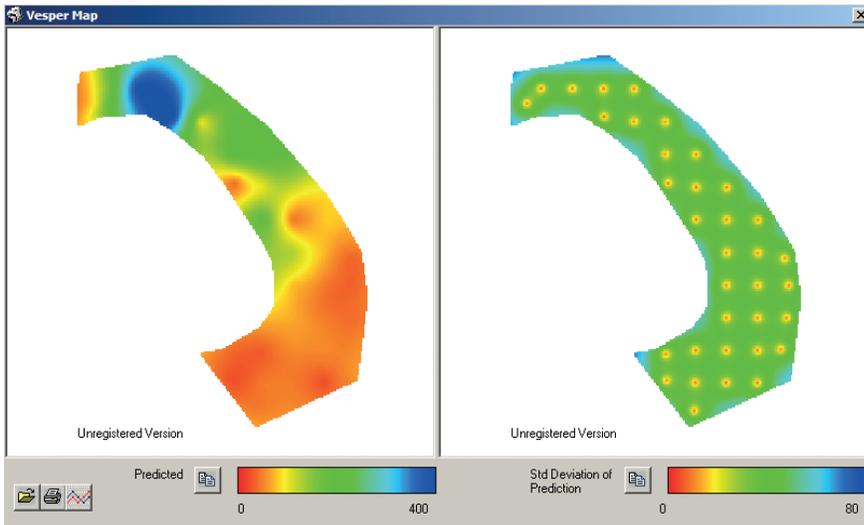


Figura 8.8. Mapa do erro das estimativas ilustrando a influência do limitado número de observações na precisão dos resultados do ajuste do variograma.

8.7 Modelos Parametrizados na Variografia

A busca por ferramentas mais efetivas para as etapas iniciais do processo de adoção da AP justifica-se na complexidade operacional e o alto custo das intervenções atualmente disponíveis para o manejo diferenciado. Decisões que requisitam modelos mais simples e acessíveis (MCBRATNEY et al., 2005) em contraste ao histórico das significativas contribuições em modelos quantitativos parametrizados pelo variograma (DIGGLE; RIBEIRO JUNIOR, 2007, HAMLETT et al., 1986). Entretanto, estes modelos são frutos de investigações científicas que envolvem o conhecimento específico e uma elaborada formulação matemática, sendo em sua maioria pouco ou nada acessíveis aos agricultores e técnicos agrícolas. É preciso integrar os conceitos agrônômicos, os métodos quantitativos e a tecnologia avançada de for-

ma mais gradativa aos processos já estabelecidos para gerenciamento operacional do campo.

Alguns modelos matematicamente simples com base nos parâmetros de ajuste do variograma sugerem a razão de aleatoriedade (Cambardella et al., 1994) ou a razão de dependência (ZIMBACK, 2001). Estes podem ser facilmente calculados, gerando indicadores categóricos semi-quantitativos que indicam o grau da estrutura espacial da variação (i.e.: fraca, média e forte). Outra opção de referência da dependência espacial de atributos de solo, propõe a estimativa de variogramas médios e proporcionais que orientam na definição de fluxos decisórios na adoção da AP (MCBRATNEY; Pringle, 1999). Um exemplo de modelagem voltada para extrair informações de acervos de dados em alta densidade propõe um índice de oportunidade na adoção da AP, o qual considera dois componentes parametrizados pelo variograma e pelas dimensões operacionais. Este considera a magnitude e a estrutura espacial da variação (OLIVEIRA, 2009), ajustando a formulação original (PRINGLE et al., 2003) para o cultivo de grãos. Este modelo também teve os fatores de caráter operacional ajustados para compensar obstáculos morfológicos nas intervenções em talhões de vitivinicultura (TISSEYRE; MCBRATNEY, 2007). Este índice considera a covariância média de todo o talhão, o efeito pepita do variograma e um coeficiente de variação por unidade de área para quantificação da magnitude da variação. A estrutura espacial da variação considera a maior distância de autocorrelação da variável e um comprimento operacional estabelecido segundo as dimensões da plataforma e a velocidade de operação do implemento agrícola. A Tabela 8.2 apresenta os resultados de alguns destes indicadores para atributos de solo selecionados do talhão T6.

Tabela 8.2 Caracterização de índices parametrizados pelo variograma para quantificação da dependência espacial e da oportunidade na adoção da AP.

Atributo do Solo	Ano	Parâmetros Médios e Proporcionais ¹			Índice de Cambardella ²		S _i ³	
		Maior C1**	Menor C0* ou Maior a1***	Oportuno MCSE?	C0/C0+ C1 (%)	Dependência Espacial	S _i = $\sqrt{M_p \cdot S_p}$	Oportuno MCSE?
Argila	2009	Sim	Sim	Sim	0	Forte	-	-
Areia	2009	Não	Sim	Não	0	Forte	-	-
pH	2010	Não	Sim	Não	66	Média	-	-
Potássio	2009	Sim	Sim	Sim	0	Forte	-	-
	2010	Sim	Sim	Sim	0	Forte	-	-
Fósforo	2009	Sim	Sim	Sim	4	Forte	-	-
	2010	Sim	Sim	Sim	15	Forte	-	-
Ca	2009	-	-	-	42	Média	-	-
	2010	-	-	-	24	Forte	-	-
Mg	2009	-	-	-	38	Média	-	-
	2010	-	-	-	1	Forte	-	-
M.O.	2009	-	-	-	12	Forte	-	-
CE _s	2010	-	-	-	71	Média	5,8	Sim

*C0 = efeito pepita; **C1 = variância estrutural; ***a1 = alcance.

¹McBratney & Pringle, 1999; ²Cambardella et al., 1994; ³(Oliveira et al., 2007).

(-) Indica que a análise não se aplica ao atributo; seja pela inexistência de variogramas médios ou proporcionais de referência, ou pelo limitado número de amostras que impossibilita o uso do S_i.

Por fim, um ponto inovador a ser observado nesta abordagem quantitativa é que os modelos baseiam-se na ideia de analisar e dimensionar a variação dos fatores de produção diretamente sobre os valores observados em alta densidade.

Conclusão

Esta obra introduz um resumo dos conceitos básicos da geostatística e da inserção das suas técnicas no contexto da adoção da Agricultura de Precisão. Tem como ponto central o uso de um software aplicativo concebido para ser acessível e eficiente no processamento de dados oriundos do monitoramento intensivo e na geração de informações quantitativas em apoio a tomada de decisão. O conteúdo não se propõe a ser completo ou detalhado na descrição formal ou apresentação das técnicas de geoestatística, tendo o objetivo de ser informativo e prático, enquanto apresentando a interface do Vesper para procedimentos de análise do variograma e interpolação por krigagem. Esta apresentação é feita na forma de tradução do manual de uso, disponível apenas em inglês, sendo fiel a forma de apresentação dos procedimentos do documento original.

A expectativa é a de se ter produzido um conjunto de orientações técnicas, referências teóricas e exemplos práticos que possam ser úteis tanto na investigação científica quanto na assistência técnica das ações de campo. Sem entrar no mérito das formulações matemáticas, o livro busca, a cima de tudo, ser objetivo, ilustrativo, acessível e claro quanto ao potencial de aplicação da geoestatística na realidade do campo, transformando uma simples descrição de procedimentos operacionais na oportunidade de passar uma mensagem didática que auxilie no entendimento das técnicas. Acreditamos que o conteúdo como apresentado esteja acessível para aqueles usuários em fases iniciais de contato com a geoestatística, por traduzir a visão de especialistas que ingressaram nesta área do conhecimento pelo lado aplicado e operacional das investigações de campo em Agricultura de Precisão.

A execução dos procedimentos é descrita passo a passo na sequência lógica da análise geoestatística, e suas aplicações ilustradas de forma cronológica com o ciclo de adoção das técnicas de manejo da produção por “sítio-específico”. Desta forma, esperamos viabilizar para os leitores uma visão ampla e aplicada das técnicas que podem facilitar a integração e o entendimento da massiva quantidade de dados heterogêneos e assíncronos gerados pela rápida proliferação de diferentes sensores de campo. Questões estas que quiçá potencializem

um conhecimento agronômico incremental, dado volume de informações disponíveis permitindo uma visão mais detalhada das relações espaço-temporais dos processos agronômicos.

Referências Bibliográficas

- ADAMCHUK, V. I.; HUMMEL, J. W.; MORGAN, M. T.; UPADHYAYA, S. K. On-the-go soil sensors for precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 44, n. 1, p. 71-91, Jul. 2004.
- AKAIKE, H. Information theory and an extension of maximum likelihood principle. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INFORMATION THEORY, 2., 1973, Budapest. **Proceedings...** Budapest: Akademia Kiado, 1973. p. 267-281.
- BANKER, M. P. R. de. **Cartografia**: noções básicas. Rio de Janeiro: DHN, 1965. 242 p.
- BERALDO, P.; SOARES, S. M. **GPS**: introdução e aplicações práticas. Criciúma: Luana, 1995. 150 p.
- BERNARDI, A. C. de C.; INAMASU, R. Y. Adoção de agricultura de precisão em algumas das principais regiões agrícolas brasileiras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2014, São Pedro, SP. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2014. Disponível em: <<http://www.sbea.org.br/conbap/2014/trabalhos/R0039-1.PDF>>. Acesso em: 19 jul. 2015.
- BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de precisão**: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. 596 p.
- BOLFE, E. L.; GOMES, J. B. V. **Geoestatística subsidia agricultura de precisão**. 2005. Disponível em: <<http://www.paginarural.com.br/artigo/998/geoestatistica-subsidia-agricultura-de-precisao>>. Acesso em: 19 jul. 2015.
- CÂMARA, G.; MEDEIROS J. S. de. **Geoprocessamento para projetos ambientais**. São José dos Campos: Inpe, 1996.
- CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. de. Princípios básicos do geoprocessamento. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. (Ed.). **Sistema de informações geográficas**: aplicações na agricultura. 2. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa-CPAC, 1998. p. 411-423.
- CAMARGO, E. Geoestatística: fundamentos e aplicações. In: CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. de (Org.). **Geoprocessamento para projetos ambientais**. 2. ed. São José dos Campos: Inpe, 1998.
- CAMARGO, E. C. G.; FUKS, S. D.; CÂMARA, G. Análise espacial de superfícies. In: DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. V. M. (Ed.). **Análise espacial de dados geográficos**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. cap. 3. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/cap3-superficies.pdf>>. Acesso em: 19 jul. 2015.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CRESSIE, N. A. C. **Statistics for spatial data**. New York: J. Wiley and Sons, 1991. 900 p.

DEUTSCH, C. Correcting for negative weights in ordinary kriging. **Computers & Geosciences**, v. 22, n. 7, p. 765-713, Aug. 1996.

DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JUNIOR, P. J. **Model-based geostatistics**. New York: Springer, 2007. 228 p.

GARCIA, P. A. G. **Geoestatística operacional**. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral, 1988. 145 p.

GEBBERS, R. Current crop and soil sensors for precision agriculture. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2014, São Pedro, SP. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2014. Disponível em: <http://www.researchgate.net/publication/272016538_Current_Crop_and_Soil_Sensors_for_Precision_Agriculture>. Acesso em: 19 jul. 2015.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. 483 p.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 2, p. 169-177, 2005.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P. de; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada a agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 74-83.

HAAS, T. C. Kriging and automated variogram modeling within a moving window. **Atmospheric Environment. Part A. General Topics**, v. 24, n. 7, p. 1759-1769, 1990.

HAMLETT, J. M.; HORTON, R.; CRESSIE, N. A. C. Resistant and exploratory techniques for use in semivariogram analyses. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, n. 4., p. 868-875, 1986.

HUIJBREGTS, C. J. Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data. In: DAVIS, J. C.; McCULLAGH, M. J. (Ed.). **Display and analysis of spatial data**. New York: J. Wiley, 1975. p. 38-53.

IBGE. **Noções básicas de cartografia**. Rio de Janeiro, 1998. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/cartografia/nocoes_basicas_cartografia.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2015.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

JIAN, X.; OLEA, R. A.; YU, Y.-S. Semivariogram modeling by weighted least squares, **Computers & Geosciences**, v. 22, n. 4, p. 387-397, May 1996.

JOURNAL, A. G. **Fundamentals of geostatistics in five lessons**. Washington, DC: American Geophysical Union, 1989. 80 p.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, Johannesburg, v. 52, n. 6, p. 151-163, Dec. 1951.

LANDIM, P. M. B.; CORSI, A. C. **Cálculo de superfícies de tendência, por regressão polinomial, pelo SURFER®**. Rio Claro, SP: Unesp, 2001. 11 p. (Texto didático, 5). Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/DIDATICOS/LANDIM/trend-surfer.pdf>>. Acesso em: 19 jul. 2015.

LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R.; MONTEIRO, R. C. **Krigagem ordinária para situações com tendência regionalizada**. Rio Claro, SP: Unesp, 2002. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/DIDATICOS/LANDIM/tkrigagem.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2015.

LIMA, E. R. V. de. Geoestatística aplicada ao estudo do solo. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, 3., 2006, Aracaju. **Mini-cursos...** Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2006. Disponível em: <www.cpatc.embrapa.br/srgsr/mini-curso/geoestat.ppt>. Acesso em: 9 nov. 2015.

MARQUARDT, D. W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. **Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics**, v. 11, n. 2, p. 431-441, 1963.

MATHERON, G. **Les variables régionalisées et leur estimation**: une application de la théorie de fonctions aléatoires aux sciences de la nature. Paris: Masson, 1965. 306 p.

MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its applications**. Paris: École Nationale Supérieure des Mines, 1971. 211 p.

MCBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing functions for the semivariograms of soil properties and fitting them to sample estimates. **European Journal of Soil Science**, v. 37, n. 4, p. 617-639, Dec. 1986.

MCBRATNEY, A. B.; PRINGLE, M. J. Estimating average and proportional variograms of soil properties and their potential use in precision agriculture. **Precision Agriculture**, v. 1, n. 2, p. 125-152, Sept. 1999.

MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M.; ANCEV, T.; BOUMA, J. Future directions of precision agriculture. **Precision Agriculture**, v. 6, n. 1, p. 7-23, Feb. 2005.

MCCOWN, R. L.; BRENNAN, L. E.; PARTON, K. A. Learning from the historical failure of farm management models to aid management practice. Part 1. The rise and demise of theoretical models of farm economics. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 57, p. 143-156, 2006.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. **Vesper version 1.62**. Sydney: Australian Centre for Precision Agriculture, 2005.

MOLIN, J. P. Agricultura de precisão no Brasil: estado atual e perspectivas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SOJA, 6., 2012, Cuiabá. **Soja**: integração nacional e desenvolvimento sustentável: anais. Brasília, DF: Embrapa, 2012. 1 CD-ROM.

MOLIN, J. P. Geração interpretação de mapas de produtividade para agricultura de precisão. In: BORÉM, A.; GIÚDICE, M. P. del; QUEIROZ, D. M. de; MANTOVANI, E.

C.; FERREIRA, L. R.; VALLE, F. X. R. do; GOMIDE, R. L. (Ed.). **Agricultura de precisão**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2000. p. 237-258.

MOLIN, J. P. Agricultura de precisão, parte I: o que é e estado da arte em sensoriamento. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 17, n. 2, p. 97-107, dez. 1997.

OLIVEIRA, R. P. de. **Contributions towards decision support for site-specific crop management**: a study of aspects influencing the development of knowledge-intensive differential management decisions. 2009. 318 f. Thesis (Doctor of Philosophy) - University of Sidney, Sydney.

OLIVEIRA, R. P. de; WHELAN, B.; MCBRATNEY, A.; TAYLOR, J. Yield variability as an index supporting management decisions: YIELDex. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 6., 2007, Skiathos. **Proceedings...** Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2007. p. 281-288.

ORTIZ, G. da C. **Aplicação de métodos geoestatísticos para identificar a magnitude e a estrutura da variabilidade espacial de variáveis físicas do solo**. 2002. 75 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.

PANNATIER, Y. **VARIOWIN**: software for spatial data analysis in 2D. New York: Springer, 1996. (Statistics and computing).

PEREIRA, G. T.; PANOSSO, A. R.; TEIXEIRA, D. B. Introdução à geoestatística. In: WORKSHOP SOBRE TECNOLOGIAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA DA REDE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2010, São Carlos, SP. **Anais...** São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2010.

PRINGLE, M. J.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M.; TAYLOR, J. A. A preliminary approach to assessing the opportunity for site-specific crop management in a field, using a yield monitor. **Agricultural Systems**, v. 76, n. 1, p. 273-292, Apr. 2003.

RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y.; TORRE NETO, A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; MOLIN, J. P. **Medida de condutividade elétrica do solo adaptada a uma plantadeira**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2008. 4 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Circular técnica, 46).

REYNS, P.; MISSOTTEN, B.; RAMON, H.; DE BAERDEMAEKER, J. A review of combine sensors for precision farming. **Precision Agriculture**, v. 3, n. 2, p. 169-182, Jun. 2002.

SANTOS, G. R. **Hierarquização geométrica dos preditores geoestatísticos**. 2010. 200 f. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agropecuária) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. 2. ed. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2006. 214 p. (Coleção ensino da ciência e da tecnologia, 9).

SOUZA, L. da S. **Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo**. 1992. 162 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SPEKKEN, M.; MOLIN, J. P. Criação de grades amostrais adequadas em talhões agrícolas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2012, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: SBEA, 2012. Disponível em: <http://www.agriculturadeprecisao.org.br/upimg/publicacoes/pub_criacao-de-grades-amostrais-adequadas-em-talhoes-agricolas--spekken-m--molin-j-p--conbap--2012-06-08-2015.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2015.

SRIVASTAVA, R. M. Describing spatial variability using geostatistics analysis. In: ROUHANI, S.; SRIVASTAVA, R. M.; DESBARATS, A. J.; CROMER, M. V.; JOHNSON, A. I. (Ed.). **Geostatistics for environmental and geotechnical applications**. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 1996. p. 13-19.

STAR, J.; ESTES, J. **Geographic information systems: an introduction**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1990. 303 p.

STURARO, J. R. **Estudo do comportamento espacial de variáveis geológicas e hidrogeológicas da área urbana de Ribeirão Preto - SP**. 1988. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

STURARO, J. R. **Mapeamento geoestatístico de propriedades geológico-geotécnicas obtidas em sondagens de simples reconhecimento**. 1994. 183 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

SUDDUTH, K. A.; KITCHEN, N. R.; BOLLERO, G. A.; BULLOCK, D. G.; WIEBOLD, W. J. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 3, p. 472-482, 2003.

TISSEYRE, B.; MCBRATNEY, A. B. A technical opportunity index based on mathematical morphology for site-specific management using yield monitor data: application to viticulture. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 6., Skiathos, 2007. **Proceedings...** Skiathos: Wageningen Academic Publishers, 2007. p. 249-256.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v. 38, p. 45-94, 1985.

VALLADARES, G. S.; AZEVEDO, E. C. de; CAMARGO, O. A. de; GREGO, C. R.; RASTOLDO, A. M. C. S. Variabilidade espacial e disponibilidade de cobre e zinco em solos de vinhedos e adjacências. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 3, p. 733-742, set. 2009.

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

VIEIRA, S. R.; CARVALHO, J. R. P. de; PAZ GONZÁLEZ, A. Jack knifing for semivariogram validation. **Bragantia**, Campinas, v. 69, p. 97-105, 2010. Suplemento.

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

VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, n. 6, p. 1040-1048, 1981.

VIEIRA, S. R.; XAVIER, M. A.; GREGO, C. R. Aplicações de geoestatística em pesquisas com cana-de-açúcar. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.). **Cana de açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. p. 839-852.

WALTER, C.; MCBRATNEY, A. B.; DOUAOUI, A.; MINASNY, B. Spatial prediction of topsoil salinity in the Chelif valley, Algeria, using local kriging with local variograms versus local kriging with whole-area variogram. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 39, n. 2, p. 259-272, 2001.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. In: STEWART, B. A. (Ed.). **Advances in soil science**. New York: Springer-Verlag, 1985. v. 3, p. 1-70.

WEBSTER, R.; MCBRATNEY, A. B. On the Akaike Information Criterion for choosing models for variograms of soil properties. **Journal of Soil Science**, v. 40, n. 3, p. 493-496, Sept. 1989.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. 2 ed. Chichester: J. Wiley and Sons, 2007. 315 p.

WHELAN, B. M. **Reconciling continuous soil information and crop yield**: a study of some implications for within-field variability for site-specific crop management. 1998. 327 f. Thesis (Doctor of Philosophy) - Faculty of Agriculture, University of Sydney, Sydney.

WHELAN, B. M.; MCBRATNEY, A. B.; VISCARRA-ROSSEL, R. A. Spatial prediction for precision agriculture. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., Minneapolis, 1996. **Proceedings...** Minneapolis: [American Society of Agronomy], 1996, p. 331-342.

WHELAN, B. M.; MCBRATNEY, A. B.; MINASNY, B. Vesper: spatial prediction software for precision agriculture. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., 2001, Montpellier. **Proceedings...** Montpellier: Ecole Nationale Agronomique de Montpellier, 2001. p. 139-144.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: Conceitos e Aplicações**. Editora Oficina de Textos, 2013. 215 p.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrômicas, Universidade Estadual Paulista "Júli

Anexo I

Formulário de Registro (original em Inglês)

VESPER Registration Form

16-Dec-15
Version: 1.6.2

Name	
Organisation	
E-mail	
Address	
Country	

Provide a User Name (3-20 Characters) Case sensitive	
---	--

<i>We are also interested to learn where the program is being used for.</i> Application of the program (Optional):

Registration cost (single-licence):

Inside Australia	A\$50	European Union	€50
New Zealand	NZ\$55	US	US\$50
Rest of the world	Enquire	Canada	CA\$50

No. of licences:	
Total cost:	
(Australia add 10% GST)	

Method of payment:

(Cheque or money order should be made payable to Australian Centre for Precision Agriculture)

- Cheque
 Visa
- Other:
 MasterCard

Name on card	
Card no.	
Expiry date	
Signature	
Date	

Please fax or send this registration form to:
Australian Centre for Precision Agriculture
The University of Sydney
McMillan Building A05, NSW 2006, Australia
Fax: (+61 2) 9351 3706

We will send you the serial number by e-mail once we've received your registration form/ payment.

Anexo II

Arquivo de Controle

Advanced application

Understanding the control file:

A control file contains all the parameters needed to run Vesper, it is in a text file with the format as follows:

\$vsl	tag, don't change
ivers= 161111	tag, don't change
title= 'Kriging analysis'	title of the analysis in single quotation mark ''
datfil= 'D:\vesper\data\1HXYZ.TXT'	file containing the data
outdir= 'D:\vesper\data'	output directory
repfil= 'report.txt'	name of report file
outfil= 'kriged.txt'	name of kriged file
parfil='parameter.txt'	name of parameter file
numcol= 3	number of columns in the input file
icol_x= 1	column no. containing x value in the input file
icol_y= 2	column no. containing y value in the input file
icol_z= 3	column no. containing z value in the input file
jordkrig= 1	ordinary kriging (leave as is)
jpntkrig= 1	1 = point kriging , 0 = block kriging
jllockrg= 0	1 = local variogram kriging , 0 = global variogram
nest= 10	no. of estimated grid for calculating block (leave as is)
dstlnc= 10	distance between interpolation (for rectangular grid)
valmis=-9999	missing value
jsetint= 0	1 = set interpolation rectangle
xlint= 0	if jsetint=1, min x for interpolation
xhint= 0	if jsetint=1, max x for interpolation
ylint= 0	if jsetint=1, min y for interpolation
yhint= 0	if jsetint=1, min y for interpolation
jsetrad= 0	1 = set radius, 0 = calculate radius
radius= 100	search radius (when jsetrad=1)
minpts= 40	min. no. of points for interpolation
maxpts= 50	max. no. of points for interpolation
sigmsqr= 0	sigma2
isomod= 1	isotropic model (leave as is)
modtyp= 2	variogram model no.
isearch= 0	isotropic search (leave as is)
igeos= 0	parameter for anisotropic search (leave as is)
icircs= 0	parameter for anisotropic search (leave as is)
phi= 0	parameter for anisotropic search (leave as is)
psin= 0	parameter for anisotropic search (leave as is)
pcos= 0	parameter for anisotropic search (leave as is)
jcomvar= 1	1=compute variogram, 0= define the variogram parameter
nlaa= 30	no. of laqs

Anexo III

Fórmulas Utilizadas nos Cálculos do Vesper

Semivariance Formula (to create Variogram cloud)

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

Formula for Variogram models

SPHERICAL

if ($h < A1$) then

$$\rho = 1 - 1.5 h/A1 + 0.5 * (h/A1)^3$$

else

$$\rho = 0$$

endif

$$\text{gamma} = C0 + C1 * (1 - \rho)$$

EXPONENTIAL

$$\rho = \exp(-h/A1)$$

$$\text{gamma} = C0 + C1 * (1 - \rho)$$

GAUSSIAN

$$\rho = \exp(-(h/A1)^2)$$

$$\text{gamma} = C0 + C1 * (1 - \rho)$$

LINEAR WITH SILL

if($h < A1$) then

$$\rho = 1 - (h/A1)$$

else

$$\rho = 0$$

end if

$$\text{gamma} = C0 + C1 * (1 - \rho)$$

STABLE

$$\rho = \exp[-(h/A1)^{\text{alfa}}]$$

$$\text{gamma} = C0 + C1 * (1 - \rho)$$

($0 < \text{alfa} < 2$)

GENERALISED CAUCHY

$$\rho = (1 + (h/A1)^2)^{-\text{alfa}}$$

$$\text{gamma} = C0 + C1 * (1 - \rho)$$

($\text{alfa} > 0$)

MATERN

$$\rho_h = 1/[2^{(\text{SMOOTH}-1)} * \Gamma(\text{SMOOTH})] * (h/A1)^{\text{SMOOTH}} * \text{Bess}_{\text{SMOOTH}}(h/A1)$$

$$\text{gamma} = C0 + C1 * (1 - \rho_h)$$

where

$\Gamma(\dots)$ is Gamma function.

$\text{Bess}_{\text{SMOOTH}}(\dots)$ is the modified Bessel function of the third kind of order smooth.

($0 < \text{SMOOTH} < 2$)

Matern is a general model that is flexible and can be used to approximate function behaving as exponential (smooth = 0.5), power, or Whittle (Bessel function) model (smooth = 1).

DOUBLE_SPHERICAL

if ($h < A2$) then

$$\rho_{h1} = 1 - 1.5 * h/A1 + 0.5 * (h/A1)^3$$

$$\rho_{h2} = 1 - 1.5 * h/A2 + 0.5 * (h/A2)^3$$

if ($h > A1$) then

$$\rho_{h1} = 0$$

end if

else

$$\rho_{h1} = 0$$

$$\rho_{h2} = 0$$

end if

$$\text{gamma} = C0 + C1 * (1 - \rho_{h1}) + C2 * (1 - \rho_{h2})$$

DOUBLE_EXPONENTIAL

$$\rho_{h1} = \exp(-h/A1)$$

$$\rho_{h2} = \exp(-h/A2)$$

$$\text{gamma} = C0 + C1 * (1 - \rho_{h1}) + C2 * (1 - \rho_{h2})$$

Weighting Formula

The variogram model is fitted to the data by using a weighted nonlinear least-squares method (Jian et al., 1996), which minimises:

$$R = \sum_{i=1}^n w_i [\hat{\gamma}(h_i) - \hat{\gamma}^*(h_i)]^2$$

AIC Formula

AIC = $-2 \ln(\text{maximum likelihood}) + 2 (\text{number of parameters})$,

and is estimated by:

$$\text{AIC} = n \ln(R) + 2p$$

where R is the sum of squares of residuals, and p is the number of parameters.

Embrapa

Solos



2015

Apoio:

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Ministra - Kátia Regina de Abreu

Secretaria do Produtor Rural e Cooperativismo

Secretário - Caio Tibério Dornelles da Rocha

Departamento de Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Rural

Diretor Substituto - Fabricio Santana Santos

Serviço em Agricultura de Precisão

Chefe - Fabricio Vieira Juntolli

Diagramação, Impressão e Acabamento



Assis - SP
Fone: (18) 3322-5775
Fone/Fax: (18) 3324-3614
vendas@graficatriunfal.com.br
www.graficatriunfal.com.br



ISBN 978-857035572-0



9 788570 355720

Embrapa

Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
PÁTRIA EDUCADORA