

**MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA**  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**MODELAGEM AMBIENTAL COM TRATAMENTO DE INCERTEZAS EM  
SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA: O PARADIGMA  
GEOESTATÍSTICO POR INDICAÇÃO**

Carlos Alberto Felgueiras

Tese de Doutorado em Computação Aplicada, orientada pela Dra. Suzana Druck Fuks e pelo Dr. Antônio Miguel Vieira Monteiro, aprovada em 21 de dezembro de 1999.

INPE  
São José dos Campos  
1999

*Por isso vos digo: Pedi e dar-se-vos-á;  
buscai, e achareis; batei e abrir-vos-á;  
Pois todo o que pede recebe;  
o que busca acha;  
e o que bate abrir-se-lhe-á.  
( Lucas, 11:9,10)*

*Aos meus pais de criação  
Anibal (em memória) e Eugênia,  
à minha esposa Débora e à minha filha Carla*

## **AGRADECIMENTOS**

À Jesus Cristo, por ter me guiado espiritualmente nesta caminhada de crescimento pessoal e profissional.

Aos orientadores deste trabalho, Dra. Suzana Druck Fuks e Dr. Antônio Miguel Vieira Monteiro, pela confiança, apoio, paciência e amizade.

Aos estimados amigos de trabalho da Divisão de Processamento de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, pela camaradagem, cooperação e amizade.

À chefia da Divisão de Processamento de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, pela oportunidade, confiança e apoio logístico.

Aos membros da banca examinadora, pela predisposição em analisar este trabalho e pelas sugestões recebidas.

Finalmente, agradeço a todos que direta ou indiretamente colaboraram na elaboração desta tese.

## RESUMO

Os produtos de modelagens envolvendo propriedades e processos do meio físico natural, gerados no ambiente computacional de Sistemas de Informação Geográfica, SIG, como mapas de aptidão agrícola, mapas de vulnerabilidade à erosão, zoneamento ecológico-econômico, para citar alguns, deveriam fornecer informação quantitativa sobre a qualidade dos produtos disponibilizados, uma vez que são destinados a apoiar processos de tomada de decisão. A tecnologia atual dos SIG não incorpora, em seus procedimentos, a noção de qualidade aos diferentes cenários que é capaz de produzir através da integração e operação sobre dados espaciais de diversas naturezas. Assim, em relação ao uso sistemático de ambientes de SIG, no atual estágio da tecnologia, para as mais diversas modelagens em apoio a processos decisórios, o que efetivamente tem acontecido chega a ser temerário. Na imensa maioria dos casos, nenhuma informação quantitativa sobre a qualidade dos produtos gerados é agregada ao produto final, e o que era para ser um *cenário*, uma possível resposta a uma determinada modelagem para os dados envolvidos no processamento, passa a ser a expressão da verdade. É neste contexto que se insere este trabalho. *Uma proposta de sistematização, baseada no paradigma da modelagem geoestatística por indicação, para uso em modelagem computacional desenvolvida em ambiente de SIG.* As técnicas e métodos, apontados pela sistematização aqui proposta, são explorados na teoria e na prática, através de sua implementação, e são demonstradas em estudos de caso. Este trabalho dedica especial atenção à formulação de técnicas de estimativa e métricas de incerteza que possam abordar, de forma unificada, dados geográficos de natureza temática (categórica) e numérica (contínua), apresentando resultados promissores. Discute-se e testa-se a hipótese do uso de dados indiretos, quando há pouca disponibilidade de amostras, como forma de se procurar melhorar a acurácia das inferências utilizadas. A integração destes procedimentos aos ambientes de SIG, em seu atual estágio de desenvolvimento tecnológico, é discutida e os requisitos básicos para esta integração são apresentados. Com este trabalho espera-se estar contribuindo na direção de orientar arquitetos e desenvolvedores de SIG para incorporar as ferramentas de modelagem espacial necessárias à manipulação de dados geográficos, com suas medidas de incertezas associadas, e à propagação das incertezas para os produtos de modelagem ambiental, que irá qualificar o produto resultante do uso da tecnologia.

## ABSTRACT

The use of Geographic Information Systems (GIS) to model environmental phenomena limits decision-making processes because the products of GIS modeling, such as agriculture suitability and vulnerability to erosion maps or economic-ecological zoning, do not encompass quantitative information on data quality. Current GIS technology does not associate the notion of data quality to the various scenarios resulting from integrating and combining different spatial data. This situation requires attention and jeopardizes decision-making processes based on GIS. In most cases there is no information on data quality aggregated to the final products. As a consequence, what should be a scenario of possible answers to a certain modeling turns out to be the expression of truth. The present research is concerned with issues that come from this context. This thesis is a *proposal towards a systematic computational modeling in GIS based on the paradigm of indicator geostatistic modeling*. The proposed techniques and methods are implemented and demonstrated through case studies. This work is especially concerned with the formulation of estimation techniques and uncertainty metrics that can treat both thematic (categorical) and numerical (continuous) geographic data. It also discusses and tests the hypothesis of using soft data to improve the estimate accuracy when only a few samples are available. The integration of these procedures in a GIS environment, as well as the basic requirements for such integration, is discussed and presented. This research contributes to guide GIS designers and developers to incorporate spatial modeling tools required for an appropriate handling of geographic data, taking their uncertainties into consideration when the data set is directly involved in environmental modeling.

## SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS .....	X
LISTA DE TABELAS .....	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS E NOTAÇÕES .....	xiv
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
1.2 DEFINIÇÕES PRELIMINARES .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
1.4 CONTRIBUIÇÕES DA TESE .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
<b>CAPÍTULO 2 MODELAGEM AMBIENTAL EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA COM TRATAMENTO DE INCERTEZAS</b> .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
2.2 MODELAGEM AMBIENTAL E SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA	<b>ERRO!</b>
<b>INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>	
2.2.1 <i>A natureza da modelagem ambiental em meio digital</i>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.2.1.1 A dimensão espaço-temporal e a natureza contínua dos processos da natureza .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.2.1.2 O mundo contínuo e o mundo discreto dos computadores digitais .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.2.1.3 Representações de continuidade a partir de dados amostrais	<b>Erro!</b>
<b>Indicador não definido.</b>	
2.2.2 <i>Modelagem de dados espaciais em SIG</i>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.2.3 <i>Modelagem computacional para modelos ambientais em SIG</i>	<b>Erro!</b>
<b>Indicador não definido.</b>	
2.3 PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS EM MODELAGEM AMBIENTAL COM SIG	<b>ERRO!</b>
<b>INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>	
2.3.1 <i>Método de Taylor de primeira ordem....</i>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.3.2 <i>Método de Taylor de segunda ordem...</i>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.3.3 <i>Método de Rosenblueth.....</i>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.3.4 <i>Método de Monte Carlo .....</i>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.4 O PARADIGMA DA MODELAGEM ESTOCÁSTICA POR INDICAÇÃO	<b>ERRO!</b>
<b>INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>	
2.5 CONCLUSÕES .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>

### **CAPÍTULO 3 INFERÊNCIAS COM ESTIMATIVA DE INCERTEZAS POR KRIGEAGEM .....ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**

- 3.1 INTRODUÇÃO .....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
- 3.2 CONCEITOS GERAIS DA GEOESTATÍSTICA.....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
- 3.3 O ESTIMADOR DE KRIGEAGEM LINEAR .....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
- 3.4 A VARIÂNCIA DE KRIGEAGEM LINEAR COMO MEDIDA DE INCERTEZA: UMA ANÁLISE CRÍTICA.....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
- 3.5 O ESTIMADOR DE KRIGEAGEM POR INDICAÇÃO**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
  - 3.5.1 *A krigeagem por indicação para atributos numéricos***Erro! Indicador não definido.**
  - 3.5.2 *A krigeagem por indicação para atributos temáticos***Erro! Indicador não definido.**
  - 3.5.3 *Estimativa de incertezas locais para atributos numéricos***Erro! Indicador não definido.**
  - 3.5.4 *Estimativa de incertezas locais para atributos temáticos***Erro! Indicador não definido.**
  - 3.5.5 *Vantagens e desvantagens da krigeagem por indicação***Erro! Indicador não definido.**
- 3.6 CONCLUSÕES .....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**

### **CAPÍTULO 4 INFERÊNCIAS COM ESTIMATIVA DE INCERTEZAS POR SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA CONDICIONADAERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**

- 4.1 INTRODUÇÃO .....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
- 4.2 O PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO SEQUENCIAL CONDICIONADA**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
- 4.3 INFERÊNCIA DE ESTATÍSTICAS A PARTIR DOS VALORES SIMULADOS**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
  - 4.3.1 *Estatísticas sobre realizações de atributos numéricos***Erro! Indicador não definido.**
  - 4.3.2 *Estatísticas sobre realizações de atributos temáticos***Erro! Indicador não definido.**
- 4.4 ESTIMATIVA DE INCERTEZAS UTILIZANDO SIMULAÇÃO SEQUENCIAL CONDICIONADA.....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
  - 4.4.1 *Estimativa de incertezas locais para atributos numéricos simulados***Erro! Indicador não definido.**
  - 4.4.2 *Estimativa de incertezas locais para atributos temáticos simulados***Erro! Indicador não definido.**
  - 4.4.3 *Métricas globais de incerteza para atributos simulados***Erro! Indicador não definido.**
- 4.5 COMPARAÇÃO ENTRE SIMULAÇÃO CONDICIONADA E KRIGEAGEM**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
- 4.6 CONCLUSÕES .....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**

### **CAPÍTULO 5 INFERÊNCIAS COM ESTIMATIVA DE INCERTEZAS COM O USO DE DADOS INDIRETOSERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**

- 5.1 INTRODUÇÃO .....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
- 5.2 OS PROBLEMAS DE SUBAMOSTRAGEM E DE AMOSTRAGEM INADEQUADA PARA INFERÊNCIAS BASEADAS NA GEOESTATÍSTICA**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
- 5.3 CODIFICAÇÃO POR INDICAÇÃO DE DADOS AMOSTRAIS DIRETOS E INDIRETOS .....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
- 5.4 A KRIGEAGEM POR INDICAÇÃO COM DADOS DIRETOS E INDIRETOS**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
- 5.5 A COKRIGEAGEM POR INDICAÇÃO .....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
- 5.6 OTIMIZAÇÃO PELO MODELO MARKOV-BAYES **ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
- 5.7 OTIMIZAÇÃO PARA DADOS COLOCALIZADOS ..**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
- 5.8 INFERÊNCIA E ESTIMATIVA DE INCERTEZAS LOCAIS E GLOBAIS COM O USO DE DADOS DIRETOS E INDIRETOS.....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
- 5.9 CONCLUSÕES .....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**

## **CAPÍTULO 6 ESTUDOS DE CASOS E ANÁLISES****ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**

- 6.1 INTRODUÇÃO .....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
- 6.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA UTILIZADA NOS ESTUDOS DE CASO**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
- 6.3 ESTUDO DA PROPRIEDADE ALTIMETRIA SOB REPRESENTAÇÃO NUMÉRICA: CASO CANCHIM .....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
  - 6.3.1 *Inferências com estimativa de incertezas por krigeagem ordinária***Erro! Indicador não definido.**
  - 6.3.2 *Inferências com estimativa de incertezas por krigeagem por indicação*..... **Erro! Indicador não definido.**
  - 6.3.3 *Inferências com estimativa de incertezas por simulação sequencial condicionada*..... **Erro! Indicador não definido.**
  - 6.3.4 *Análise e comparação dos resultados obtidos***Erro! Indicador não definido.**
- 6.4 ESTUDO DA TEXTURA DO SOLO SOB REPRESENTAÇÃO TEMÁTICA: CASO CANCHIM .....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
  - 6.4.1 *Inferências com estimativa de incertezas por krigeagem por indicação* **Erro! Indicador não definido.**
  - 6.4.2 *Inferências com estimativa de incertezas por simulação sequencial condicionada*..... **Erro! Indicador não definido.**
  - 6.4.3 *Análise e comparação dos resultados obtidos***Erro! Indicador não definido.**
- 6.5 USO DE DADOS INDIRETOS .....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
  - 6.5.1 *Uso do mapa de solos para estimar o atributo textura do solo***Erro! Indicador não definido.**
  - 6.5.2 *Análise dos resultados e comparação com estimativas sem dados indireto*..... **Erro! Indicador não definido.**
- 6.6 MEDIDAS GLOBAIS DE INCERTEZA .....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**
- 6.7 CONCLUSÕES .....**ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.**

## **CAPÍTULO 7 INTEGRAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS GEOESTATÍSTICOS AOS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA****ERRO! INDICADOR NÃO D**

7.1	INTRODUÇÃO .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
7.2	SIG E GEOESTATÍSTICA.....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
7.2.1	<i>Importância do SIG para implementação das facilidades da geoestatística.....</i>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
7.2.2	<i>Importância dos procedimentos de geoestatística para um SIG</i>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
7.2.3	<i>Integração da geoestatística a um SIG.</i>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
7.3	MÓDULOS DE GEOESTATÍSTICA INTEGRADOS A UM SIG	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
7.3.1	<i>Requisitos básicos de um módulo de geoestatística para um SIG</i>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
7.3.2	<i>O módulo de geoestatística do SPRING</i>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
7.3.3	<i>O módulo de geoestatística do IDRISI..</i>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
7.3.4	<i>O módulo de geoestatística do PCRaster</i>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
7.3.5	<i>Outros módulos de geoestatística .....</i>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
7.4	LINGUAGENS PARA MODELAGEM AMBIENTAL COM TRATAMENTO DE INCERTEZA.....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
7.4.1	<i>ADAM: uma ferramenta para modelagens com propagação de incertezas .....</i>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
7.4.2	<i>A linguagem LEGAL com tratamento de incertezas: Uma especificação preliminar de requisitos ..</i>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
7.5	CONCLUSÕES .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
<b>CAPÍTULO 8 CONCLUSÕES .....</b>		<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
8.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
8.2	SUGESTÕES PARA FUTURAS INVESTIGAÇÕES	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>166</b>
<b>APÊNDICE A DADOS UTILIZADOS NO TRABALHO .....</b>		<b>172</b>
A.1	DADOS DE CONTORNO DA FAZENDA CANCHIM .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
A.2	DADOS AMOSTRAIS DE ALTIMETRIA.....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
A.3	DADOS AMOSTRAIS DE CLASSES DE TEXTURA DO SOLO .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1: Operações locais: (a) pontuais e (b) de vizinhança em modelagem computacional (baseado em Heuvelink, 1998).	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 3.1: Variograma teórico ajustado sobre variograma experimental obtido a partir das amostras. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 3.2: Codificação por indicação dos dados amostrais numéricos para um valor de corte $z = z_k$ .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 3.3: Codificação por indicação dos dados amostrais temáticos para uma classe de corte $z = z_k$ .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 3.4: Correção dos desvios de relação de ordem para dados numéricos (baseado em Deutsch e Journel, 1998)	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 4.1: Obtenção de um valor da VA a partir da função de distribuição de probabilidade acumulada inferida para um atributo numérico. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 4.2: Obtenção de um valor da VA a partir da função de distribuição de probabilidade acumulada inferida para um atributo temático.	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 5.1: Exemplo de ajuste para dados de amostragem reduzida e pouco representativa (sem alguns valores máximos, mínimos e pontos de inflexão). ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 5.2: Exemplo de ajuste para uma amostragem com valores de máximos, mínimos e pontos de inflexão.	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 6.1: Localização da Fazenda Canchim. FONTE: Calderano Filho et al. 1996, p. 4. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 6.2: Distribuição espacial das amostras, sobreposta à representação em imagem nível de cinza, da altimetria de Canchim .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 6.3: Mapa de valores inferidos por krigeagem ordinária utilizando o conjunto amostral de altimetria .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 6.4: Histograma do conjunto amostral de altimetria de Canchim	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 6.5: Mapa de incertezas locais obtido a partir da variância do erro de krigeagem ordinária. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 6.6: Mapa de valores médios inferidos a partir das fdac locais construídas pelo procedimento de krigeagem por indicação	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 6.7: Mapa de incertezas locais obtido a partir das variâncias inferidas dos modelos de distribuição probabilística construídos pela krigeagem por indicação. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 6.8: Mapa de medianas inferidas a partir das fdac locais construídas pelo procedimento de krigeagem por indicação	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 6.9: Mapa de incertezas locais obtido a partir dos quartis, primeiro e terceiro, inferidos dos modelos de distribuição probabilística construídos pela krigeagem por indicação.	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 6.10: Mapa de classes de altimetria inferido por intervalos de probabilidade a partir das fdac inferidas pela krigeagem por indicação. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>

- Figura 6.11: Mapa de incertezas por intervalos de probabilidades referente à classificação apresentada na Figura 6.10 **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 6.12: Mapa de valores médios inferidos a partir de um conjunto de 400 realizações geradas por simulação sequencial condicionada as amostras de altimetria apresentadas na Figura 6.2. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 6.13: Mapa de incertezas obtido a partir das variâncias inferidas dos modelos de distribuição probabilística construídos pela simulação sequencial condicionada aos dados de altimetria. **Erro! Indicador não d**
- Figura 6.14: Distribuição das amostras de textura de solo na região de Canchim. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 6.15: Mapas de valores de textura do solo inferidos pelo procedimento de krigeagem por indicação com 12 pontos condicionantes. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 6.16: Mapa de incerteza por moda estimado a partir do procedimento de krigeagem por indicação usado para inferir o mapa da Figura 6.15 ..... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 6.17: Classificação do mapa de incerteza apresentado na Figura 6.16 ..... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 6.18: Mapas de valores estimados de textura do solo e incertezas associadas com, no máximo, 4 e 16 pontos condicionantes **Erro! Indicador não de**
- Figura 6.19: Mapa de incerteza por entropia de Shannon estimado a partir do procedimento de krigeagem por indicação usado para inferir o mapa da Figura 6.15 ..... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 6.20: Espacialização do atributo textura do solo condicionada a diferentes limiares (0.38, 0.4 e 0.5) máximos de incerteza **Erro! Indicador não defi**
- Figura 6.21: Gráficos de Médias de Incerteza por Número Máximo de PC's **Erro! Indicador não**
- Figura 6.22: Gráficos de Variâncias de Incerteza por Número Máximo de PC's ..... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 6.23: Exemplos de realizações do atributo textura do solo geradas pela simulação sequencial ..... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 6.24: Mapa de valores de textura do solo inferidos pelo critério de frequência máxima a partir do conjunto de realizações gerados pela simulação sequencial. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 6.25: Incertezas associadas aos valores de textura de solo mostrados na Figura 6.24. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 6.26: Mapa de Solos da região da fazenda Canchim **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 6.27: Mapa de valores de textura inferido por simulação sequencial condicionada a dados diretos e indiretos **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 6.28: Mapa incertezas, por moda, associadas aos valores de textura inferidos por simulação sequencial condicionada a dados diretos e indiretos ..... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 6.29: Mapas das Figuras 6.27 e 6.28 com os contornos do mapa de solo sobrepostos. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 7.1: Estrutura do Módulo de Geoestatística no SPRING (Fonte: Camargo et al., 1999) ..... **Erro! Indicador não definido.**

- Figura 7.2: Tela principal do SPRING 3.3 com a interface de interação para análise de continuidade espacial por semivariograma **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 7.3: Interface do SPRING 3.3 para ajuste de um modelo teórico para o semivariograma experimental **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 7.4: Interface do SPRING 3.3 para espacialização do atributo por krigeagem simples ou ordinária..... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 7.5: Ilustração do Modelador de Dependência Espacial do sistema IDRISI32. Fonte: <http://www.idrisi.com/03prod/ldrisi.htm> **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 7.6: Interface de ajuste de curvas do IDRISI32. Fonte: <http://www.idrisi.com/03prod/ldrisi.htm> **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 7.7: Interface de krigeagem e simulação do IDRISI32. Fonte: <http://www.idrisi.com/03prod/ldrisi.htm> **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 7.8: Exemplo de ajuste de variograma pelo programa GSTAT **Erro! Indicador não definido.**

## LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 3.1: Exemplo de cálculos de incertezas para várias distribuições .....	53
Tabela 6.1: Parâmetros estatísticos sobre o conjunto amostral de altimetria de Canchim .....	91
Tabela 6.2: Parâmetros dos variogramas teóricos definidos para os dados de altimetria transformados por indicação nos valores de corte apresentados.....	95
Tabela 6.3: Classes de textura com probabilidades a priori .....	107
Tabela 6.4: Parâmetros dos variogramas teóricos definidos para os dados de textura do solo transformados por indicação .....	109
Tabela 6.5: Estatísticas dos valores de incertezas, por moda e por entropia, obtidos por krigeagem por indicação para números máximos de PC distintos .....	115
Tabela 6.6: Extensão dos tipos de solos da região de Canchim .....	126
Tabela 6.7: Probabilidade de ocorrência das classes de textura de solo para cada classe de solo da região .....	127
Tabela 6.8: Estatísticas das medidas de imprecisão com e sem dados indiretos.....	129

## LISTA DE SÍMBOLOS E NOTAÇÕES

$A$ :	região ou área de estudo
$B(z_k)$ :	coeficientes de calibração da variável secundária a partir da primária
$C(\mathbf{h})$ :	covariância entre variáveis aleatórias, VA, em função de $\mathbf{h}$
$C(\mathbf{u}_\beta - \mathbf{u}_\alpha)$ :	covariância entre as amostras de um atributo posicionadas em $\mathbf{u}_\beta$ e $\mathbf{u}_\alpha$
$C_l(\mathbf{h}; z_k)$ :	autocovariância da VA por indicação $l$ em função de $\mathbf{h}$ e de $z_k$
$C_l(\mathbf{h}_{\alpha\beta}; z_k)$ :	autocovariância da VA por indicação $l$ definida para $\mathbf{h}_{\alpha\beta}$ e para $z_k$
$C_l(\mathbf{h}_\alpha; z_k)$ :	autocovariância da VA por indicação $l$ definida para $\mathbf{h}_\alpha$ e $z_k$
$C_Y(\mathbf{h}; z_k)$ :	autocovariância da VA $Y$ em função de $\mathbf{h}$ e de $z_k$
$C_{lY}(\mathbf{h}; z_k)$ :	covariância cruzada entre as VA $l$ e $Y$ em função de $\mathbf{h}$ e de $z_k$
$C_R(\mathbf{h})$ :	autocovariância da função residual
$d_\alpha$ :	distância euclidiana da amostra $\alpha$ e o ponto a ser interpolado
$E\{Z\}$ :	valor esperado da variável aleatória $Z$
$E\{Z(\mathbf{u})\}$ :	esperança da VA $Z$ definida para a posição espacial $\mathbf{u}$
$E\{l(\mathbf{u}; z_k) (n)\}$ :	valor esperado da VA por indicação em $z_k$ condicionado a $n$ amostras
$f(z)$	função de densidade de probabilidade de uma VA $Z$
$f(\mathbf{u}, z (n)$ :	função densidade de probabilidade de $Z(\mathbf{u})$ , condicionada a $n$ amostras.
$F(\mathbf{u}; z)$ :	função de distribuição acumulada da variável aleatória $Z(\mathbf{u})$
$F(\mathbf{u}; z (n)$ :	função de distribuição acumulada condicionada, fdac, a $n$ amostras da VA $Z(\mathbf{u})$
$F^*(z_k)$ :	valor estimado da média estacionária em $A$ para $z = z_k$
$F^*(\mathbf{u}; z_k)$ :	valor estimado para a fdac de $Z(\mathbf{u})$ em $z = z_k$
$F^*(\mathbf{u}; z_k (n)$ :	valor estimado para a fdac de $Z(\mathbf{u})$ em $z_k$ , condicionada a $n$ amostras
$F^*(\mathbf{u}; z_k (n+K)$ :	valor estimado para a fdac de $Z(\mathbf{u})$ em $z_k$ , condicionada a $n$ amostras diretas e $K$ observações indiretas
$F(z_1, \dots, z_m)$ :	função de distribuição conjunta de $m$ variáveis aleatórias
$F(z_1, \dots, z_m (n)$ :	função de distribuição conjunta de $m$ VA condicionada a $n$ amostras
$\mathbf{g}$ :	função que relaciona atributos de entrada numa modelagem espacial
$\mathbf{h}$ :	vetor de separação entre duas posições espaciais
$\mathbf{h}_\alpha$ :	vetor de separação definido por $\mathbf{u}_\alpha$ e uma posição $\mathbf{u} \in A$
$\mathbf{h}_{\alpha\beta}$ :	vetor de separação definido pelas posições amostrais $\mathbf{u}_\alpha$ e $\mathbf{u}_\beta$
$H$ :	valor da entropia de Shannon
$H(\mathbf{u})$ :	valor da entropia de Shannon definida para a posição $\mathbf{u}$
$H(\mathbf{h})$ :	entropia referente ao vetor de separação $\mathbf{h}$
$H_R(\mathbf{h})$ :	entropia relativa normalizada referente ao vetor de separação $\mathbf{h}$
$l(\mathbf{u}; z_k)$ :	conjunto amostral codificado por indicação no valor de corte $z_k$

$i(\mathbf{u}_\alpha; z_k)$ :	valor da amostra direta em $\mathbf{u}_\alpha$ e codificada por indicação em $z_k$
$j(\mathbf{u}_\alpha; z_k)$ :	valor da amostra indireta em $\mathbf{u}_\alpha$ e codificada por indicação em $z_k$
$Inc(\mathbf{u})$ :	valor de incerteza determinado para a posição espacial $\mathbf{u}$
$\mathbf{k}$ :	matriz de covariâncias entre amostras e posição $\mathbf{u}$ do valor a ser estimado
$K$ :	número total de valores de corte usados na codificação por indicação
$\mathbf{K}$ :	matriz de covariâncias entre amostras de um atributo espacial
$L$ :	número total de realizações de uma variável ou de uma função aleatória
$m$ :	número total de variáveis aleatórias que formam um campo aleatório
$m^{(0)}(z_k)$ :	valor esperado de VA secundária $Y(\mathbf{u}, z_k)$ dado que a VA primária, $I(\mathbf{u}; z_k)$ , é igual a 0
$m^{(1)}(z_k)$ :	valor esperado de VA secundária $Y(\mathbf{u}, z_k)$ dado que a VA primária, $I(\mathbf{u}; z_k)$ , é igual a 1
$n$ :	número total de amostras (diretas) de um atributo espacial
$n(\mathbf{u})$ :	número total de amostras vizinhas de uma localização espacial $\mathbf{u}$
$N$ :	número de atributos de entrada de uma modelagem espacial
$N(\mathbf{h})$ :	número de pares de amostras separadas pelo vetor $\mathbf{h}$
$p_j(\mathbf{u})$ :	probabilidade de ocorrência da classe $j$ na posição $\mathbf{u}$
$p_i^{(l)}$ :	probabilidade de ocorrência da $i$ -ésima VA na $l$ -ésima realização
$\rho_{k,k'}(\mathbf{h})$ :	probabilidade bivariada, $Prob\{Z(\mathbf{u}) \in \text{a classe } k \text{ e } Z(\mathbf{u}') \in \text{a classe } k'\}$ referente ao vetor de separação $\mathbf{h}$
$q_j$ :	$i$ -ésimo quantil de uma distribuição de probabilidade
$q_{0.5}$ :	mediana de uma distribuição de probabilidade
$S_k$ :	$k$ -ésima classe de uma variável aleatória categórica
$\mathbf{u}$ :	vetor de coordenadas
$\mathbf{u}_\alpha$ :	coordenadas referentes as amostras
$Y$ :	variável aleatória de um atributo de saída de uma modelagem espacial
$Y(\mathbf{u}; z_k)$ :	conjunto amostral indireto codificado por indicação no corte $z_k$
$y(\mathbf{u}_\alpha; z_k)$ :	valor de probabilidade a priori, em $\mathbf{u} = \mathbf{u}_\alpha$ e $z = z_k$ , obtida a partir de dados indiretos
$z$ :	realização de uma variável aleatória $Z$
$z_i$ :	$i$ -ésima realização da variável aleatória $Z_i$
$z_{im}$ :	valor médio da $i$ -ésima variável aleatória $Z_i$
$z(\mathbf{u}_\alpha)$ :	valor do atributo na amostra vizinha localizada em $\mathbf{u}_\alpha$
$z(\mathbf{u})$ :	valor do atributo inferido numa posição $\mathbf{u}$
$z_S^*(\mathbf{u})$ :	valor do atributo inferido, por krigeagem simples, na posição $\mathbf{u}$
$z_O^*(\mathbf{u})$ :	valor do atributo inferido, por krigeagem ordinária, na posição $\mathbf{u}$
$z^{(l)}(\mathbf{u})$ :	$l$ -ésima realização da variável aleatória $Z$ em $\mathbf{u}$
$z_i^{(l)}$ :	valor obtido da $i$ -ésima variável aleatória na $l$ -ésima realização
$Z$ :	variável aleatória representando um atributo espacial
$Z(\mathbf{u})$ :	variável aleatória definida para a posição $\mathbf{u}$
$Z_i$ :	$i$ -ésima variável aleatória

$Z_i(\mathbf{u})$ :	$i$ -ésima variável aleatória definida para a posição $\mathbf{u}$
$\phi(\mathbf{u})$ :	multiplicador de Lagrange referente à posição $\mathbf{u}$
$\phi(\mathbf{u}; z_k)$ :	multiplicador de Lagrange para posição $\mathbf{u}$ e valor de corte $z_k$
$\gamma(\mathbf{h})$ :	semivariograma estacionário para o vetor de separação $\mathbf{h}$
$\lambda_\alpha(\mathbf{u})$ :	valor de ponderação referente à amostra $\alpha$ e à posição $\mathbf{u}$ .
$\lambda_{S\alpha}(\mathbf{u})$ :	valor de ponderação de krigagem simples referente à amostra $\alpha$ e à posição $\mathbf{u}$ .
$\lambda_{O\alpha}(\mathbf{u})$ :	valor de ponderação de krigagem ordinária referente à amostra $\alpha$ e à posição $\mathbf{u}$ .
$\lambda_{S\alpha}(\mathbf{u}; z_k)$ :	ponderador de krigagem por indicação simples para $z = z_k$ , amostra $\alpha$ e posição $\mathbf{u}$
$\lambda_{O\alpha}(\mathbf{u}; z_k)$ :	ponderador de krigagem por indicação ordinária para $z = z_k$ , amostra $\alpha$ e posição espacial $\mathbf{u}$
$\mu$ :	média estacionária de uma função aleatória
$\mu(\mathbf{u})$ :	valor esperado ou média de uma variável aleatória em $\mathbf{u}$
$\mu_Y$ :	valor esperado ou média da variável aleatória $Y$
$v_\beta(\mathbf{u}; z_k)$ :	peso de cokrigagem da variável secundária para $z=z_k$ e observada em $\mathbf{u}$
$\rho_{ij}$ :	coeficiente de correlação entre duas variáveis aleatórias $i$ e $j$ .
$\sigma_Y^2$ :	variância da variável aleatória $Y$
$\sigma_O^2$ :	variância do erro do estimador de krigagem ordinária
$\sigma_Y$ :	desvio padrão da variável aleatória $Y$