

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**INPE-**

**GEOPROCESSAMENTO AMBIENTAL COM TRATAMENTO DE  
INCERTEZA: O CASO DO ZONEAMENTO PEDOCLIMÁTICO PARA A  
SOJA NO ESTADO DE SANTA CATARINA**

Simone Bönisch

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. Antônio Miguel  
Vieira Monteiro e pelo Dr. Gilberto Câmara, aprovada em setembro de 2001.

INPE  
São José dos Campos  
2001

## RESUMO

No ambiente de Sistemas de Informações Geográficas, com raríssimas exceções, nenhuma informação quantitativa sobre a qualidade dos produtos gerados é agregada ao produto final. Neste contexto, o presente estudo aborda a modelagem de propriedades e processos do meio físico natural com a geração de informações quantitativas das incertezas associadas aos cenários produzidos pelas modelagens, que utilizam análise integrada de dados espaciais em meio digital. No presente estudo, utilizou-se dos conceitos para métricas de incerteza espacial com base no paradigma da geoestatística por indicação. O estudo de caso apresentado é baseado no Projeto Zoneamento Pedoclimático do Brasil, aplicado para a cultura da soja no Estado de Santa Catarina. São sugeridas três modificações na metodologia original de integração de dados deste projeto. Estas modificações correspondem à consideração da aptidão climática como um conceito dinâmico, à modelagem dos atributos definidores da aptidão pedoclimática por técnicas da *krigeagem* por indicação e à aferição dos resultados encontrados por informações adicionais de controle, relacionadas à produtividade da soja. Com a modelagem por *krigeagem* por indicação, foi possível modelar atributos categóricos e numéricos, possibilitando em ambos os casos uma estimativa para uma medida espacial de incerteza associada a cada propriedade modelada. As representações obtidas nas modelagens foram integradas e as respectivas incertezas propagadas, obtendo-se no final de todo o processo de análise espacial uma representação de aptidão pedoclimática categórica e outra numérica, assim como as incertezas relativas a estas representações. Estas representações espaciais constituíram as bases para a determinação dos cenários possíveis de zoneamento pedoclimático para a cultura da soja catarinense. Na análise dos resultados, por uma avaliação das incertezas estimadas e dos resultados encontrados na aferição, foi possível avaliar tanto os dados iniciais que formaram os conjuntos amostrais no processo de modelagem, quanto a própria metodologia de zoneamento. Concluiu-se que, para uso em operação desta metodologia, é importante que os dados primários, quer sejam originários de estações remotas, caso dos dados de clima, quer sejam dados de perfil e amostras, caso dos dados de solo, necessitam de um tratamento de consistência rigoroso, principalmente no que se refere aos dados de solo. A dificuldade em encontrar dados digitais, organizados e confiáveis, também impõe enormes dificuldades para a implantação de procedimentos operacionais de definição de zoneamentos de culturas em escala regional, uma necessidade para o planejamento da produção em um país com as dimensões do Brasil.

## **ABSTRACT**

The modeling of natural properties and processes in GIS environment, with very few exceptions, take into account the need for producing a quantitative assessment of the quality of the spatial output generated from a series of manipulation and transformations over the primary data. This study has focus its attention to the methodological questions related to the production of spatial analysis that integrates data and generates as outcome a spatial representation associated to a measure of confidence on that spatial information being generated, named a measure of uncertainty for spatial data. To present these techniques this study has taken the Santa Catarina state zoning methodology for the soybean culture. Three modifications, from the original methodology for data integration, have been proposed. The first relates to take the climate influence as a dynamic concept; the second relates to the modeling of all measured properties through geostatistics and the use of the indicator kriging; and the third the use of a control data for the assessment of the scenarios generated by the different techniques used to spatial data integration. The results have demonstrated that the use of quantitative methodologies, based on the primary collected data, have made possible to assess the quality of the initial data, and at the same time it offers a possibility for the assessment of techniques used by checking against a control data, in this case the productivity of soybean for each one of the cities in the Santa Catarina state. The difficulties in finding primary data, in digital format, catalogued and organized, particularly in the case of soil data, makes it very difficult to implement in operational setups, services that would benefit the planning of agricultural production at a regional scale.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pelo apoio e, à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa concedida.

Ao Dr. Eduardo Assad pela sugestão do caso de estudo, e à toda sua equipe da Embrapa – Cerrados, pela cessão de dados meteorológicos.

Ao Prof. Jaime Almeida do Departamento de Solos da Universidade Estadual de Santa Catarina, ao IBGE / Agência Florianópolis, na pessoa do Sr. José Mozer e, à Epagri, na pessoa do Sr. Hugo Braga, pela cessão de dados climáticos e pedológicos.

Ao Departamento de Geomática da Universidade Federal do Paraná pela disponibilização de suas instalações e estrutura de trabalho.

Aos colegas Carlos Felgueiras e Eduardo Camargo que contribuíram com seus conhecimentos em geoestatística.

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

Aos Drs. Antônio Miguel Vieira Monteiro e Gilberto Câmara, pela confiança, credibilidade, respeito e amizade.

E, ao Monroe Olsen pelo amor, apoio e incentivo.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	
<b>LISTA DE TABELAS</b>	
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b> .....	21
1.1 – Contextualização.....	21
1.2 – Objetivo do estudo.....	24
1.3 – Objetivos específicos.....	24
1.4 – Organização da dissertação.....	25
<b>CAPÍTULO 2 – CONCEITOS FUNDAMENTAIS</b> .....	27
2.1 – Modelagem por técnicas da geoestatística.....	27
2.1.1 – <i>Krigeagem</i> por indicação aplicada a dados de natureza numérica.....	29
2.1.2 – <i>Krigeagem</i> por indicação aplicada a dados de natureza categórica.....	32
2.2 – Propagação das incertezas associadas aos atributos numéricos.....	33
2.3 – Propagação das incertezas associadas aos atributos categóricos.....	35
<b>CAPÍTULO 3 – ESTUDO DE CASO</b> .....	39
3.1 – Descrição do estudo de caso.....	39
3.2 – Dados coletados.....	40
3.2.1 – Dados climáticos.....	40
3.2.2 – Dados pedológicos.....	43
3.2.3 – Dados de controle.....	46
3.3 – Análise categórica.....	47
3.3.1 – Zoneamento da aptidão climática categórica.....	47
3.3.1.1 – Análise multivariada para estimativa de temperatura média decendial.....	49
3.3.1.2 – Modelagem da soma térmica.....	69
3.3.1.3 – Déficit hídrico.....	83
3.3.2 – Zoneamento da aptidão pedológica categórica.....	85
3.3.3 – Zoneamento da aptidão pedoclimática categórica.....	109
3.4 – Avaliação numérica.....	119
3.4.1 – Zoneamento da aptidão climática numérica.....	119
3.4.2 – Zoneamento da aptidão pedológica numérica.....	141
3.4.3 – Zoneamento da aptidão pedoclimática numérica.....	167
3.5 – Aferição dos resultados.....	177
<b>CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES</b> .....	181
4.1 - Análise dos resultados.....	181

4.2 - Conclusões.....	188
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>191</b>
<b>APÊNDICE A – DADOS UTILIZADOS NO ESTUDO.....</b>	<b>199</b>
<b>APÊNDICE B - PROGRAMAS ELABORADOS EM LEGAL, PARA A MODELAGEM DE ATRIBUTOS CATEGÓRICOS E NUMÉRICOS, POR KRIGEAGEM POR INDICAÇÃO, NO SOFTWARE SPRING 3.4.....</b>	<b>247</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Ilustração da correção do desvio de relação de ordem, na modelagem de atributos numéricos, utilizando <i>krigeagem</i> por indicação.....	32
3.1 Distribuição espacial das estações monitoradas pela Epagri.....	42
3.2 Distribuição das estações monitoradas pelo DNAEE.....	42
3.3 Disposição espacial dos perfis e amostras de solos.....	46
3.4 Gráficos de probabilidade normal dos resíduos dos modelos aplicados para o 14º decêndio, respectivamente, para as variáveis transformadas e para as não transformadas.....	59
3.5 Distribuição espacial das 121 estações selecionadas para a modelagem da aptidão climática.....	69
3.6 Ajuste do modelo teórico esférico – Classe Tolerada – subperíodo 1.....	72
3.7 Espacialização das classes de aptidão climática segundo a soma térmica – subperíodo 1.....	74
3.8 Aptidão climática categórica segundo a soma térmica e incerteza associada – subperíodo 1.....	75
3.9 Aptidão climática categórica segundo a soma térmica e incerteza associada – subperíodo 2.....	76
3.10 Aptidão climática categórica segundo a soma térmica e incerteza associada – subperíodo 3.....	77
3.11 Aptidão climática categórica segundo a soma térmica e incerteza associada – subperíodos 4 e 5.....	78
3.12 Aptidão climática categórica segundo a soma térmica e incerteza associada – subperíodo 6.....	79
3.13 Aptidão climática categórica segundo a soma térmica e incerteza associada – subperíodo 7.....	80
3.14 Aptidão climática categórica segundo a soma térmica e incerteza associada – subperíodo 8.....	81

3.15 Aptidão climática categórica segundo a soma térmica e incerteza associada – subperíodo 9.....	82
3.16 Fertilidade categórica segundo a capacidade de troca de cátions e incerteza associada.....	90
3.17 Fertilidade categórica segundo a saturação por bases e incerteza associada.....	91
3.18 Fertilidade categórica segundo a soma por bases e incerteza associada.....	92
3.19 Fertilidade categórica segundo o alumínio trocável e incerteza associada.....	93
3.20 Fertilidade categórica segundo o potássio e incerteza associada.....	94
3.21 Aptidão pedológica categórica segundo a textura e incerteza associada.....	95
3.22 Aptidão pedológica categórica segundo as classes de relevo e incerteza associada.....	96
3.23 Aptidão pedológica categórica segundo a profundidade efetiva e incerteza associada.....	97
3.24 Aptidão pedológica categórica segundo a drenagem e incerteza associada.....	98
3.25 Aptidão pedológica categórica segundo a pedregosidade e/ou rochosidade e incerteza associada.....	99
3.26 Aptidão pedológica categórica segundo a primeira integração das representações de fertilidade e incerteza associada.....	102
3.27 Aptidão pedológica categórica segundo a segunda integração das representações da fertilidade e incerteza associada.....	103
3.28 Aptidão pedológica categórica segundo a fertilidade e incerteza associada.....	104
3.29 Aptidão pedológica categórica referente aos parâmetros fertilidade, textura, profundidade efetiva e drenagem, e incerteza associada.....	106
3.30 Aptidão pedológica categórica referente aos parâmetros relevo e pedregosidade e/ou rochosidade, e incerteza associada.....	107
3.31 Aptidão pedológica categórica e incerteza associada.....	108
3.32 Aptidão pedoclimática categórica e incerteza associada – subperíodo 1 (11/10 a 28/02).....	111

3.33	Aptidão pedoclimática categórica e incerteza associada – subperíodo 2 (21/10 a 10/03).....	112
3.34	Aptidão pedoclimática categórica e incerteza associada – subperíodo 3 (01/11 a 20/03).....	113
3.35	Aptidão pedoclimática categórica e incerteza associada – subperíodos 4 e 5 (11/11 a 10/04).....	114
3.36	Aptidão pedoclimática categórica e incerteza associada – subperíodo 6 (01/12 a 20/04).....	115
3.37	Aptidão pedoclimática categórica e incerteza associada – subperíodo 7 (11/12 a 30/04).....	116
3.38	Aptidão pedoclimática categórica e incerteza associada – subperíodo 8 (21/12 a 10/05).....	117
3.39	Aptidão pedoclimática categórica e incerteza associada – subperíodo 9 (01/01 a 20/05).....	118
3.40	Soma térmica numérica e incerteza associadas – subperíodo 1.....	121
3.41	Soma térmica numérica e incerteza associada – subperíodo 2.....	122
3.42	Soma térmica numérica e incerteza associada – subperíodo 3.....	123
3.43	Soma térmica numérica e incerteza associada – subperíodo 4.....	124
3.44	Soma térmica numérica e incerteza associada – subperíodo 5.....	125
3.45	Soma térmica numérica e incerteza associada – subperíodo 6.....	126
3.46	Soma térmica numérica e incerteza associada – subperíodo 7.....	127
3.47	Soma térmica numérica e incerteza associada – subperíodo 8.....	128
3.48	Soma térmica numérica e incerteza associada – subperíodo 9.....	129
3.49	Aptidão climática numérica e incerteza associada – subperíodo 1.....	132
3.50	Aptidão climática numérica e incerteza associada – subperíodo 2.....	133
3.51	Aptidão climática numérica e incerteza associada – subperíodo 3.....	134

3.52 Aptidão climática numérica e incerteza associada – subperíodo 4.....	135
3.53 Aptidão climática numérica e incerteza associada – subperíodo 5.....	136
3.54 Aptidão climática numérica e incerteza associada – subperíodo 6.....	137
3.55 Aptidão climática numérica e incerteza associada – subperíodo 7.....	138
3.56 Aptidão climática numérica e incerteza associada – subperíodo 8.....	139
3.57 Aptidão climática numérica e incerteza associada – subperíodo 9.....	140
3.58 Capacidade de troca de cátions numérica e incerteza associada.....	144
3.59 Saturação por bases numérica e incerteza associada.....	145
3.60 Soma de bases numérica e incerteza associada.....	146
3.61 Alumínio trocável numérico e incerteza associada.....	147
3.62 Potássio numérico e incerteza associada.....	148
3.63 Fertilidade numérica referente à capacidade de troca de cátions e incerteza associada.....	150
3.64 Fertilidade numérica referente à saturação por bases e incerteza associada.....	151
3.65 Fertilidade numérica referente à soma de bases e incerteza associada.....	152
3.66 Fertilidade numérica referente ao alumínio trocável e incerteza associada.....	153
3.67 Fertilidade numérica referente ao potássio e incerteza associada.....	154
3.68 Fertilidade numérica e incerteza associada.....	155
3.69 Profundidade efetiva numérica e incerteza associada.....	158
3.70 Teor de areia numérica e incerteza associada.....	159
3.71 Aptidão pedológica numérica referente à profundidade efetiva e incerteza associada.....	161
3.72 Incerteza associada à representação de aptidão pedológica numérica referente ao teor de areia.....	162
3.73 Declividade numérica (imagem superior) e aptidão pedológica numérica	

referente à declividade (imagem inferior).....	164
3.74 Aptidão pedológica numérica e incerteza associada.....	166
3.75 Aptidão pedoclimática numérica – subperíodo 1 (11/10 a 28/02).....	168
3.76 Aptidão pedoclimática numérica – subperíodo 2 (21/10 a 10/03).....	169
3.77 Aptidão pedoclimática numérica – subperíodo 3 (01/11 a 20/03).....	170
3.78 Aptidão pedoclimática numérica – subperíodo 4 (11/11 a 31/03).....	171
3.79 Aptidão pedoclimática numérica – subperíodo 5 (21/11 a 10/04).....	172
3.80 Aptidão pedoclimática numérica – subperíodo 6 (01/12 a 20/04).....	173
3.81 Aptidão pedoclimática numérica – subperíodo 7 (11/12 a 30/04).....	174
3.82 Aptidão pedoclimática numérica – subperíodo 8 (21/12 a 10/05).....	175
3.83 Aptidão pedoclimática numérica – subperíodo 9 (01/01 a 20/05).....	176
3.84 Classes de produtividade de soja, por município.....	178
3.85 Produtividade numérica de soja por município.....	178
3.86 Cruzamento das classes de produtividade com a representação de aptidão pedoclimática categórica – subperíodo 4.....	179
3.87 Cruzamento da representação de produtividade por município com a representação de aptidão climática numérica – subperíodo 4.....	180
4.1 Comparação subjetiva entre as representações de incertezas estimadas na modelagem de atributos categóricos (esquerda) e numéricos (direita).....	182
4.2 Cruzamento de dados de produtividade com o resultado obtido na análise categórica (superior esquerdo), com o resultado obtido na análise numérica (superior direito e com o resultado obtido na original metodologia do Zoneamento Pedoclimático do Brasil (inferior esquerdo).....	186

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Parâmetros estimados para os modelos de regressão multivariada para cada decênio.....	52
3.2 Resultado do teste de normalidade – nível de confiança de 95%.....	54
3.3 Resultado dos testes referentes à constância da variância dos resíduos – nível de confiança de 95%.....	56
3.4 Modelos de regressão com variáveis transformadas.....	58
3.5 Resultado dos testes de dependência espacial.....	62
3.6 Modelos de regressão espacial estimados por máxima verossimilhança.....	67
3.7 Índices de soma térmica para a soja em SC.....	70
3.8 Parâmetros dos modelos teóricos esféricos de semivariograma.....	72
3.9 Critérios para a classificação das propriedades químicas segundo a fertilidade	86
3.10 Critério para a classificação dos parâmetros agrícolas segundo a aptidão pedológica.....	86
3.11 Parâmetros dos semivariogramas teóricos referentes às classes de fertilidade	87
3.12 Parâmetros dos semivariogramas teóricos referentes às classes de aptidão pedológica.....	88
3.13 Resultado do teste de independência entre as representações categóricas de fertilidade.....	100
3.14 Resultado do teste de independência entre as representações categóricas de aptidão pedológica.....	105
3.15 Critérios para a integração das aptidões climática e pedológica.....	109
3.16 Parâmetros dos modelos de semivariogramas teóricos ajustados aos semivariogramas experimentais dos conjuntos amostrais por indicação.....	142
3.17 Parâmetros dos modelos de semivariogramas teóricos ajustados aos semivariogramas experimentais dos conjuntos amostrais por indicação dos	

parâmetros profundidade e teor de areia.....	156
3.18 Critérios para o cruzamento da representação da aptidão pedoclimática categórica e as classes de produtividade.....	179
4.1 Porcentagem das classes de aptidão pedoclimática categórica estimadas para cada subperíodo.....	185