UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

VARIABILIDADE ESPACIAL E CORRELAÇÕES ENTRE ATRIBUTOS DE SOLO E PRODUTIVIDADE NA AGRICULTURA DE PRECISÃO

JOÃO BATISTA TOLENTINO RODRIGUES

ORIENTADORA: **PROF. DR. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para a obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU - SP
JANEIRO – 2002

OFEREÇO

Aos meus pais, José e Lídia, de quem tenho recebido como herança a perseverança e a coragem de sonhar.

DEDICO

À Márcia, esposa exemplar, companheira infatigável, por fazer seus os meus projetos, pela dedicação e apoio incondicional.
Aos meus filhos, Maíra e Márcio, pela ternura e alegria que trouxeram à minha vida.

AGRADECIMENTOS:

A Deus, cujo semblante nunca vi, cuja voz jamais escutei, mas que dentro de minha alma sei que é a origem e fonte de vida, agradeço por me conduzir pela mão.

À Universidade Estadual Paulista, por oferecer-me a oportunidade de realizar o curso de Pós-Graduação em Agronomia.

À Professora Célia Regina Lopes Zimback, pela orientação segura, pela vivência enriquecedora e pelo empenho na concretização deste trabalho.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo suporte financeiro.

Aos professores Angelo Cataneo, Kleber P. Lanças, Ulisses R. Antuniassi e Sílvio Bicudo, pelas contribuições e ensinamentos partilhados.

Aos professores do Departamento de Recursos Naturais/Solos da Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP-Botucatu, pela acolhida e pela convivência fraternal.

Aos amigos Rodrigo, Caetano, Luciana, Juliana, Saulo, Edson, Ivana, Débora, João e André Salvador, pelo companheirismo e pelo aprendizado mútuo em todas as situações do convívio diário.

Aos meus familiares pelo apoio e entusiasmo.

A todos os funcionários do Departamento de Naturais/Solos da Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP-Botucatu,, pelo empenho e amizade.

Aos Engenheiros Agrônomos Rogério O. Castro e Antônio Carlos, pelo fornecimento dos dados e apoio logístico no levantamento de solos.

SUMÁRIO

Página

LISTA DE QUADROS VII
LISTA DE FIGURAS VIII
LISTA DE ANEXOS XI
1. RESUMO 1
2. SUMMARY 3
3. INTRODUÇÃO 5
4. REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA 8
4.1 A Agricultura de Precisão 8
4.2 Variabilidade espacial dos fatores de produção 13
4.3 A geoestatística como ferramenta de análise espacial 17
4.4 Sistemas de Informação Geográfica 21
4.5 Sistema de Posicionamento Global 23
4.6. Mapas de produtividade 25
5. MATERIAL E MÉTODOS 36
5.1 Descrição da área 36
5.2 Material utilizado 36
5.2.1 Mapas de produtividade de milho e soja 36
5.2.2 Mapas de aplicação localizada de adubos 37
5.2.3 Dados de precipitação pluviométrica 38
5.2.4 Atributos químicos e físicos do solo 39
5.2.5 Informações complementares 39
5.2.6 Equipamentos e programas para coleta e análise de dados 40
5.3 Método desenvolvido 40
5.3.1 Análise espacial 40
5.3.2 Interpolação dos dados de produtividade de milho e soja e de atributos do solo 44
5.3.3 Classificação dos mapas de produtividade de milho e soja 45
5.3.3.1 Análise de agrupamentos dos dados de produtividade de milho e soja 46

5.3.3.2 Determinação de classes de comportamento da produtividade de milho e soja 47
5.3.4 Obtenção de dados de precipitação pluviométrica e atributos de solo 48
5.3.5 Análise da relação da variabilidade de atributos do solo e mapas de produtividade de milho e soja..... 49
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO 50
6.1 Análise estatística descritiva e tratamento dos dados 50
6.2 Análise espacial 64
6.2.1 Análises geoestatísticas 64
6.2.2 Interpolação dos dados de produtividade de milho e soja 72
6.2.3 Padronização dos dados de produtividade de milho e soja..... 76
6.2.4 Análise de agrupamentos de dados de produtividade de milho e soja 79
6.2.5 Determinação das classes de comportamento da produtividade de milho e soja 81
6.2.6 Análise de correspondência entre agrupamentos e classes de comportamento da produtividade de milho e soja 85
6.2.7 Interpolação dos atributos de solo 85
6.2.8 Classificação dos atributos de solo 92
6.2.9 Análise da correspondência entre agrupamentos da produtividade de milho e soja e classes de atributos de solo 96
6.3 Influência da precipitação pluviométrica e da aplicação localizada de fertilizantes ... 99
7. CONCLUSÕES 101
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 103
9. ANEXOS 115

LISTA DE QUADROS

Quadro **Página**

1: Totais mensais de precipitação pluviométrica para os anos de 1997, 1998 e 1999 38
2: Informações complementares relativas aos cultivos de milho/soja/milho nos respectivos anos na Fazenda Morada do Sol (Araguari/MG) 40
3: Resultados da análise estatística descritiva para os dados de produtividade e de atributos do solo 50
4: Resultados do teste de normalidade e dos coeficientes de assimetria e curtose para todos os atributos estudados 51
5: Médias e coeficientes de variação dos valores de produtividade registrada pelo monitoramento eletrônico da colheita e pela pesagem dos caminhões..... 57
6: Resumo da análise de percentis efetuada para os dados de produtividade das três safras estudadas..... 58
7: Resultados das análises geoestatísticas para dados de produtividade e atributos de solo 65
8: Resultados das análises geoestatísticas para dados de produtividade (semivariogramas cruzados) 72
9: Taxas de coincidência entre agrupamentos e classes de comportamento da produtividade de milho e soja..... 85
10: Taxas de coincidência entre agrupamentos e classes de atributos de solo 97

LISTA DE FIGURAS

Figura **Página**

1: Semivariograma esquemático 19
2: Mapa de aplicação em dose variável que orientou o manejo localizado da adubação para a safra 1998/99 37
3: Mapa de aplicação em dose variável que orientou o manejo localizado da adubação para a safra 1999/00 38
4: Esquema de amostragem de solo na área de estudo 39
5: Exemplo de divergência total de posicionamento dos valores de produtividade para os três anos, oriundos dos mapas vetoriais 43
6: Exemplo de divergência/convergência de posicionamento dos valores de produtividade para os três anos, oriundos dos mapas rasterizados 44
7: Mapa original de produtividade de milho (1998) 52
8: Mapa original de produtividade de soja (1999) 53
9: Mapa original de produtividade de milho (2000) 53
10: Detalhe do mapa original de produtividade de milho (1998), revelando o espaçamento entre as fileiras de pontos 54
11: Histogramas dos dados de produtividade de Milho em1998, Soja em 1999, Milho em 2000, Acidez do solo (pH), Matéria Orgânica (MO), Valores originais de Fósforo (P), Valores transformados de Fósforo [Ln (P)], Potássio (K) 55
12: Histogramas dos dados de Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Soma de Bases (SB), Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Saturação por Bases (V%), Areia, Argila e Silte 56
13: Exemplo de registros de produtividade inconsistentes, identificados pela colheita efetuada no sentido transversal às linhas de plantio 59
14: Exemplos de registros inconsistentes de produtividade de milho, identificados pela redução progressiva de valores devido à mobilização de descarga 60
15: Exemplos de registros inconsistentes de produtividade de soja de difícil associação com a mobilização de descarga ou com deficiência de alimentação da plataforma 61

16: Exemplos de registros únicos para seqüências de pontos com coordenadas repetidas por problemas com o sinal do sistema DGPS 62
17: Mapa de produtividade de milho (1998), após eliminação de pontos com valores nulos ou espacialmente discrepantes e linhas de bordadura 63
18: Mapa de produtividade de soja (1999), após eliminação de pontos com valores nulos ou espacialmente discrepantes e linhas de bordadura 63
19: Mapa de produtividade de milho (2000), após eliminação de pontos com valores nulos ou espacialmente discrepantes e linhas de bordadura 64
20: Semivariograma de dados de produtividade de milho (1998) 66
21: Semivariograma de dados de produtividade de soja (1999) 66
22: Semivariograma de dados de produtividade de milho (2000) 66
23: Semivariogramas de atributos de solo: Areia; Argila; Silte; pH; Matéria Orgânica; Fósforo (como Ln(P)); Potássio; e, Cálcio 67
24: Semivariogramas de atributos de solo: Magnésio; Soma de Bases; CTC; e, Saturação por Bases (V%) 68
25: Pontos coincidentes de 1998 para o cálculo do semivariograma cruzado 69
26: Pontos coincidentes de 1999 para o cálculo do semivariograma cruzado 70
27: Pontos coincidentes de 2000 para o cálculo do semivariograma cruzado 70
28: Semivariograma cruzado para milho 98 e soja 99 71
29: Semivariograma cruzado para milho 98 e milho 2000 71
30: Semivariograma cruzado para soja 99 e milho 2000 72
31: Ausência de dados devido a problemas no cartão de registro 73
32: Mapa de produtividade de milho (1998), interpolado por krigagem 74
33: Mapa de produtividade de soja (1999), interpolado por krigagem 75
34: Mapa de produtividade de milho (2000), interpolado por krigagem 75
35: Mapa de produtividade de milho (1998), padronizada após a interpolação 77
36: Mapa de produtividade de soja (1999), padronizada após a interpolação 77
37: Mapa de produtividade de milho (2000), padronizada após a interpolação. 78
38: Imagem da composição dos três mapas de produtividade no formato RGB, onde cada célula registra o vetor com o valor padronizado dos três anos 78

39: Histograma de todos os agrupamentos exibidos pela imagem composta da produtividade pela classificação ampla 79
40: Sub-regiões (agrupamentos) definidas automaticamente pela análise de agrupamentos a partir da imagem da composição dos mapas de produtividade 80
41: Classes de produtividade padronizada para milho (1998) 82
42: Classes de produtividade padronizada para soja (1999) 82
43: Classes de produtividade padronizada para milho (2000) 83
44: Mapa das classes de comportamento obtidas pelo cruzamento e reclassificação dos mapas de classes de produtividade 84
45: Variabilidade espacial dos níveis de pH do solo (em $CaCl_2$) 86
46: Variabilidade espacial dos níveis de saturação por bases (V%) no solo 87
47: Variabilidade espacial dos níveis de capacidade de troca catiônica (CTC) 87
48: Variabilidade espacial dos teores de areia 88
49: Variabilidade espacial dos teores de silte 88
50: Variabilidade espacial dos teores de argila 89
51: Variabilidade espacial dos teores de Cálcio (Ca) 89
52: Variabilidade espacial dos teores de Magnésio (Mg) 90
53: Variabilidade espacial dos teores de Potássio (K) 90
54: Variabilidade espacial dos teores de Fósforo (P_{resina}) 91
55: Variabilidade espacial dos teores de matéria orgânica (M.O.) 91
56: Mapa de classes texturais presentes na área de estudo 93
57: Mapa de classes de níveis de acidez do solo (pH) após a última colheita 93
58: Mapa de classes de níveis saturação por bases (V%) após a última colheita 94
59: Mapa de classes de teores de Magnésio (Mg) após a última colheita 94
60: Mapa de classes de teores de Potássio (K) após a última colheita 95
61: Mapa de classes de teores de Fósforo (P) após a última colheita 95

LISTA DE ANEXOS

Anexo **Página**

I: Exemplos de seqüências de pontos com coordenadas repetidas: 116

II: Quadro de classificação do comportamento da produtividade 117

1. RESUMO

A análise de mapas de produtividade, no contexto da agricultura de precisão, é um dos recursos utilizados na tentativa de compreender e manejar a variabilidade espacial da produtividade e da qualidade das culturas. Mapas de produtividade de milho e de soja gerados por um sistema comercial de monitoramento de colheita para as safras de 1998, 1999 e 2000 foram estudados e submetidos a um processo de classificação através da técnica de análise de agrupamento para o conjunto de dados dos três anos reunidos em uma imagem composta. Objetivou-se, a partir dos agrupamentos obtidos, associar algumas tendências de variação no comportamento da produtividade que pudessem caracterizar essas regiões com comportamentos diferenciados dentro da área. Com o auxílio de um levantamento de atributos físicos e químicos do solo e outros conjuntos de informações, foi verificada a possibilidade de relacionar a variabilidade desses atributos com as sub-regiões que se pretendia identificar na área, ou se os fatores climáticos, como os índices de precipitação pluviométrica, podiam demonstrar alguma influência na produtividade em virtude da variabilidade espacial dos atributos de solo nestas sub-regiões. Foram utilizados programas geoestatísticos para estudar o nível de dependência e a estrutura da variabilidade espacial dos dados de produtividade e de atributos de solo. As análises de comportamento da produtividade e a sua classificação pela análise de agrupamentos, bem como o mapeamento de atributos do solo, foram realizados com a utilização de um sistema de informação geográfica (SIG). Os resultados obtidos demonstraram que os dados de produtividade expressaram uma dependência espacial bastante

consistente, abrangendo uma faixa de correlação com distâncias entre 30 e 40 metros. O grau de variabilidade espacial expresso pelo índice de contribuição da semivariância estrutural (%C) atingiu um alto nível de variabilidade para a safra de milho em 1998 e médio para as safras de soja em 1999 e milho em 2000. A técnica de análise de agrupamentos, aplicada ao conjunto dos três mapas de produtividade, possibilitou a divisão da área em quatro sub-regiões. A combinação dos mapas classificados por nível de produtividade permitiu definir quatro classes de comportamento da produtividade, as quais foram relacionadas às sub-regiões obtidas numa taxa de coincidência entre 60,7% e 91,4%. Por outro lado, nenhum dos atributos de solo estudados correspondeu isoladamente a um fator limitante ou estimulante à produtividade em qualquer das sub-regiões. Quando a precipitação pluviométrica anual foi bem acima e bem abaixo da média histórica, a ocorrência de baixa produtividade em lados opostos da área não foi explicada pela distribuição espacial da textura do solo. A definição de zonas de manejo a partir das sub-regiões requer ainda um levantamento de outras variáveis, em especial as que dizem respeito à oferta de água disponível às plantas e à infiltração de água no solo.

Palavras-chave: mapas de produtividade, geoestatística, SIG, análise de agrupamento, zonas de manejo

SPATIAL VARIABILITY AND CORRELATIONS BETTWEN SOIL ATRIBUTTES AND YIELD IN PRECISION AGRICULTURE. Botucatu, 2001. 116p. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: JOÃO BATISTA TOLENTINO RODRIGUES

Adviser: CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

2. SUMMARY

Yield maps analysis, into precision farming context, is one of the resources used in order to understand and manage the spatial variability of crop's yield and quality. Corn and soybean yield maps obtained from a commercial yield mapping system for three seasons (1998, 1999 and 2000) were studied and classified by a clustering analysis technique using all seasons dataset mixed in a composite image. The aim of this project was to associate some variation trends on the yield behavior to the clusters obtained, in order to characterize these regions with different behaviors within the area. Using a dataset of physical and chemical soil characteristics from a grid soil survey, it was verified the possibility of relating the soil attributes variability to the sub-regions identified in the area. It was still investigated if rainfall index could demonstrate some influence on yield due to spatial variability of the soil attributes on these sub-regions. It was used a geostatistical software for studying the dependence level and the spatial variability framework of yield and soil attributes data. Soil attributes mapping, as well yield behavior analysis and its classification by the clustering analysis were made using a geographical information system (GIS). The results showed that the yield datasets expressed a consistent spatial dependence, which correlation distances ranged from 30 to 40 meters. The spatial variability degree expressed by the structural semivariance contribution index (%C) achieved a high variability level to Corn on

1998 season and medium variability on Soybean 1999 and Corn 2000 season. The clustering analysis technique applied to the three yield maps datasets became possible split the area in four sub-regions. The combination of the maps classified by yield levels allowed defining four yield behavior classes expressively related to the obtained sub-regions. However, none of the studied soil attributes corresponded separately to a crop production limiting or stimulant factor over any sub-region. When the annual rainfall was too above and too below the historical average, the lower yield view on opposite sides of the area was not explained by the soil texture spatial distribution. The definition of management zones according to the sub-regions still require another variables surveys, specially those concerned to plant water content availability and soil drainage or soil infiltration capacity.

Keywords: yield maps, geostatistics, GIS, clustering analysis, management zones

3. INTRODUÇÃO:

A agricultura de precisão surgiu no contexto da atividade agrícola no final Do século passado, graças ao desenvolvimento e disponibilidade de algumas tecnologias, entre as quais lista-se o sistema de posicionamento global (GPS), os sensores de produtividade, técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de aplicações de insumos a taxas variáveis. É um conceito relativamente recente de manejo do solo e planta, que se baseia no princípio da aplicação localizada de insumos em função dos diferentes níveis de nutrientes disponíveis no solo ou de acordo com o nível de extração, evitando-se assim excesso ou falta de insumo em locais específicos da área.

A condição elementar que rege a adoção da agricultura de precisão - e de tecnologias de aplicação com taxas variáveis em particular - é a variabilidade espacial. A constatação da sua existência não é nenhuma novidade no meio agrícola, embora não houvesse recursos suficientes para mensurar e manejar esta variação. A agricultura de precisão, consequentemente, é uma maneira não convencional de conduzir o processo produtivo, quando as práticas agrícolas são encaradas sob a perspectiva da variabilidade espacial, em contraste com a aceitação de valores médios para o tratamento dos campos e das culturas.

Anteriormente à ascensão da agricultura de precisão, tratar áreas extensas como se fossem uniformes exigia menos tempo e propiciava maior eficiência operacional, comparado às exigências de um tratamento localizado dentro da mesma área. Por

outro lado, mesmo com os recursos disponíveis, tratar áreas extensas respeitando a heterogeneidade dos atributos de solo ou de culturas não é tarefa tão simples.

Em termos de eficiência operacional, o mapeamento da produtividade ou a aplicação de corretivos a taxa variável, a partir de um levantamento de baixa resolução, são soluções em curso. Porém, ainda não satisfazem plenamente à necessidade de informação para um tratamento localizado. Desta forma, tornar viável a identificação da variabilidade em uma escala maior, bem como das interações e influências dos inúmeros fatores relacionados com a produtividade das culturas, têm-se mostrado um grande desafio para pesquisadores e promotores de novas tecnologias.

Sob o enfoque do manejo localizado da fertilidade, a prática da agricultura de precisão pode afetar tanto os custos de insumos quanto o faturamento da produção, uma vez que a detecção da variabilidade numa escala técnica e economicamente viável permitiria a redistribuição ou mesmo a redução dos insumos nos pontos em que os níveis fossem adequados. Teoricamente, o manejo desta variabilidade poderia resultar em uma produção otimizada, ao mesmo tempo que, havendo redução no uso de insumos, reduziria as possibilidades de possíveis impactos ambientais decorrentes do uso excessivo e descontrolado destes insumos. Entretanto, mesmo havendo variabilidade, pode não fazer sentido a adoção de práticas localizadas. Antes, é preciso saber o quanto realmente variam os atributos do solo e da cultura; o quanto realmente as variações do solo afetam a produtividade ou sua qualidade; e, se é possível obter informações suficientes e as tecnologias adequadas para manejar a variabilidade de modo rentável.

Entre as diversas maneiras de conduzir a investigação da variabilidade, destacam-se a amostragem de solo em malha (grid), os mapeamentos de plantas daninhas, de condutividade elétrica do solo, de compactação, o acompanhamento do desenvolvimento da cultura por sensoriamento remoto e, de forma mais difundida, o mapeamento da produtividade por ocasião da colheita. Após identificar o nível de variação de atributos, considerando-se inclusive a variação temporal, o passo mais importante seria encontrar as relações de causa e efeito entre os atributos do solo e os dados de produtividade. Desde que a variabilidade dos atributos de solo relevantes para o controle da produtividade de culturas seja suficientemente conhecida e manejada, haverá uma perspectiva de elevação do nível de produtividade ou menor intensidade de uso de insumos.

Verifica-se uma sensível dificuldade em se estabelecer um alcance de amostragem capaz de atender satisfatoriamente, ao mesmo tempo, aos requisitos técnicos e econômicos para identificar e compreender a variabilidade dos atributos de solo, aliada ao patamar de complexidade e de custos exibidos por outros meios de averiguação. A possibilidade de definição de zonas de manejo tem se mostrado, então, uma alternativa para se estabelecer uma efetiva prática de agricultura de precisão. Entre outros meios capazes de definir estas zonas, o estudo dos dados de produtividade desponta como uma linha promissora para este esperado avanço, a fim de se obter subsídios para a melhor compreensão da variabilidade espacial e os meios de manejá-la com eficiência e economia.

Estudando mapas de produtividade de milho e soja em três anos consecutivos e os teores de nutrientes no solo, teve-se por objetivos:

- analisar o grau e a escala da dependência espacial da variação em mapas de produtividade de colheitas sucessivas na área;
- classificar o conjunto de mapas de produtividade identificando as sub-regiões que apresentam variações razoavelmente uniformes entre os sucessivos anos agrícolas; e,
- analisar a associação entre a variação na produtividade de cada sub-região, valores de precipitação pluviométrica e atributos de solo.

4. REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA

4.1 A Agricultura de Precisão

O conceito de agricultura de precisão leva em conta as características espaciais das variáveis consideradas no processo de produção, sob o enfoque de uma utilização racional do solo que conduza a um aprimoramento da produtividade com redução dos impactos ambientais, aliada a uma minimização de custos, e, para isso, as práticas agrícolas têm de ser repensadas (Lamparelli & Rocha, 1997).

De acordo com Dampney & Moore (1999), o termo agricultura de precisão refere-se às medições e manejo da variabilidade espacial dentro de culturas e campos individuais. A existência de tal variabilidade espacial tem sido reconhecida há tempos por fazendeiros e consultores. Conforme os autores, muitos fatores importantes diferentes podem exibir uma variabilidade espacial, incluindo produtividade e qualidade da cultura, tipo de solo, fertilidade do solo, padrões de cultivo, incidência de plantas daninhas, pragas e doenças. "O manejo prático na propriedade" da variabilidade espacial também não é totalmente novo, uma vez que, por muitos anos, produtores tem grosseiramente aplicado calcário em taxas diferentes em partes diferentes dos campos baseados em análises de pH do solo no campo. Finalmente, Dampney & Moore (1999) destacam que a possibilidade de manejo detalhado da variabilidade, entretanto, não foi possível até o recente advento do Sistema de Posicinamento Global (GPS) e equipamentos agrícolas capazes de mapear a variabilidade (por exemplo,

monitor de produtividade) e aplicar insumos agrícolas (por exemplo, adubadoras, pulverizadores) a taxas variáveis.

O objetivo principal da agricultura de precisão é manejar todo o conjunto de uma área particular cultivada de modo ótimo, de tal forma que os lucros agrícolas sejam maximizados e o impacto da agricultura no meio ambiente seja minimizado. É incorreto dizer que a meta da agricultura de precisão seja uniformizar a produtividade através de todo o campo. A agricultura de precisão procura perceber a produtividade potencial e a qualidade da cultura com o incremento do retorno econômico de todas as partes de um campo, com o mínimo impacto sobre o meio ambiente. Em alguns campos, pode haver mais espaço para incrementar o retorno econômico de uma área de alta produtividade já existente, em detrimento de áreas de baixa produtividade. Este será o caso se as causas da baixa produtividade forem insuperáveis (por exemplo, solos pobres). Se economicamente justificada, a taxa de aplicação de alguns insumos agrícolas pode ser variada, já que o objetivo deve ser o de efetuar a aplicação econômica ótima para cada parte da cultura. O conhecimento do desempenho da cultura e da margem bruta de diferentes campos e talhões de uma propriedade rural também podem ser valiosas informações para ajudar nas decisões sobre onde e que cultura plantar, incluindo a localização de terras não aproveitáveis. Aprimoramentos da qualidade da cultura, incluindo a consistência e a uniformidade dessa qualidade, podem também elevar os lucros (Dampney & Moore, 1999).

Os benefícios para o meio ambiente são potencialmente muito significativos apesar de geralmente não haver incentivos financeiros diretos para que os produtores adotem práticas ambientalmente corretas. A poluição de cursos d'água com nutrientes (nitratos e fosfatos) e defensivos agrícolas e a necessidade de assegurar a qualidade do alimento são princípios que têm reforçado a preocupação crescente com uma agricultura ambientalmente menos ofensiva. Para algumas regiões, a legislação ambiental pode determinar uma cobrança maior nesse sentido (Dampney & Moore, 1999). Em regiões de clima temperado, onde a fertilidade natural dos solos é elevada e políticas agrícolas incentivam a agricultura intensiva, locais com menores teores de nutrientes induzem ao abandono da área para agricultura. No caso do Brasil, os solos de um modo geral são pobres e necessitam de muita aplicação de energia e insumos para atingir produtividades razoáveis. O

conhecimento, estudo e quantificação da variabilidade da produtividade tornam-se um fator decisivo para o melhor rendimento econômico das áreas.

Em teoria, o nível de precisão ideal seria tratar planta a planta, o que é impossível econômica e tecnicamente. Por outro lado, a variabilidade de um campo pode simplesmente levar à sua divisão em duas áreas com características específicas relativamente uniformes, manejadas de modo diferenciado. Existem muitas opções intermediárias para o nível de precisão a adotar, mas a lei do máximo retorno ao menor custo significará que os maiores benefícios poderão vir de divisões mais abrangentes, ao invés de precisões muito refinadas.

Clay et al. (1999) analisaram a relação custo/benefício para os diferentes níveis de amostragem, sugerindo que para uma malha de 90m o lucro líquido seria maior que o obtido por uma amostra média para aplicação uniforme, enquanto a malha de 60m já implicaria em prejuízo, em função do aumento do custo de amostragem elevar-se exponencialmente com a redução do espaçamento. Além disso, segundo os autores, os esquemas de amostragem devem ser considerados separadamente das estratégias de adubação, uma vez que o custo do equipamento para aplicação localizada pode ser substancialmente maior que o de taxa fixa, o que pode fazer com que o retorno com a aplicação localizada seja menor para alguns tratamentos. Em concordância a isto, Dampney & Moore (1999) argumentaram que os praticantes de agricultura de precisão devem julgar conscienciosamente o nível de precisão que é apropriado para a questão envolvida, baseados no conhecimento de todos os erros potenciais. Ressaltaram ainda que os custos de obtenção de dados e de manejo provavelmente aumentem com níveis crescentes de precisão e somente um nível apropriado de precisão será economicamente viável.

Para Hopkins et al. (1999), as práticas de manejo agrícola localizado têm sido identificadas como detentoras da promessa de agredir menos o ambiente e elevar os retornos líquidos. A promessa do manejo localizado, entretanto, somente será concretizada quando as decisões a serem tomadas forem baseadas em informações espaciais. O conhecimento convencional, ratificado por Dampney & Moore (1999), dita que os produtores devem aguardar o acúmulo de dados sobre variabilidade de produtividade antes de adotar práticas de manejo localizado de culturas. Entretanto, Colvin et al., 1996, citados por Hopkins et al. (1999), relataram que a produtividade de parcelas relacionadas umas com as outras, em

um campo de Iowa (USA), não foram estáveis até para dados espaciais coletados por 6 anos. A soma de toda informação disponível, ainda conforme Hopkins et al. (1999), pode ser insuficiente para reduzir a incerteza a um nível mínimo com respeito à magnitude da variabilidade e, se existente, deve-se ou não adotar técnicas de manejo localizado.

Ferguson et al. (1999) compararam aplicações de nitrogênio a taxas variáveis com aplicações uniformes do nutriente durante 3 anos, em 4 campos diferentes no estado de Nebraska (EUA). Na maior parte dos resultados não foram encontradas diferenças significativas no total de nitrogênio (N) aplicado ou da produção de grãos ao comparar o N variável com o uniforme, e pequenas e inconsistentes diferenças do nitrato (NO_3^+) residual do solo. Segundo os autores, embora conceitualmente o manejo localizado de nitrogênio devesse ser mais eficiente, a estratégia de tratamento a taxa variável, nestes estudos, usou uma recomendação de N para milho desenvolvido para a adoção em todos os solos de Nebraska, a qual pode ser muito geral quando aplicada espacialmente no interior de um campo.

Até o momento, as tentativas de aplicação da agricultura de precisão estão restritas principalmente a agricultores inovadores, que na maioria dos casos está coletando dados espaciais sem aplicar insumos a taxa variável. Segundo Dampney & Moore (1999) esta fase de coleta de dados é essencial antes que as mudanças nas práticas de manejo sejam consideradas. Esta visão é confrontada por Hopkins et al. (1999), quando afirmam que a continuidade de práticas convencionais por períodos longos de coleta de dados de produtividade, que não se correlacionam de modo estável nesse período, tem o efeito de postergar qualquer retorno da tecnologia de mapeamento da produtividade. Um dos problemas emergentes, conforme Dampney & Moore (1999), é que muitos produtores não estão confortáveis com as técnicas de processamento de dados necessárias, particularmente porque várias fontes de dados necessitam ser integradas, exigindo conhecimentos técnicos computacionais, tornando assim o desenvolvimento de um sistema mais simples de gerenciamento de dados uma exigência importante.

Há uma vasta gama de conselhos duvidosos atualmente fornecidos aos produtores. Dampney & Moore (1999) reconheceram que isto reflete a fraqueza da base da pesquisa agronômica e as incertezas que existem em métodos de aquisição e interpretação de dados. Os autores argumentaram que, mais do que tecnologia ou maquinário, o conhecimento agronômico e a confiança do produtor são as principais barreiras atuais que limitam o

desenvolvimento suplementar das práticas de agricultura de precisão. Listam ainda o que deve ser desenvolvido em termos de pesquisa para minimizar tais barreiras:

- desenvolver métodos de medições de campo, para culturas importantes e atributos de solo, que sejam significativos, economicamente viáveis, porém quantitativos (por exemplo, usando sensores);
- quantificar os benefícios econômicos e ambientais de manejo localizado em diferentes sistemas solo-culturas;
- identificar níveis apropriados de precisão e métodos para delinear zonas de manejo no interior dos campos; e,
- desenvolver modelos de decisão aprimorados.

Embora atualmente haja uma vasta linha de tecnologias disponíveis, e quase diariamente em desenvolvimento, podem ser identificadas ainda debilidades de tecnologia. Para os autores, a agricultura de precisão precisa ser vista como um processo integrado que só será suficientemente forte quando o for o seu elo mais fraco. Não somente a própria tecnologia, mas a capacidade do usuário final usar eficiente e efetivamente a tecnologia é importante (Dampney & Moore, 1999).

Ainda segundo Dampney & Moore (1999), há o risco de que algumas tecnologias e aplicações potencialmente úteis possam tornar-se prematuramente desacreditadas pelos produtores, devido a declarações exageradas e sem comprovação, aplicações impróprias e insuficiência de pesquisas aprofundadas. Essa situação enfatiza o ponto chave de que, no momento, muito da tecnologia de equipamentos disponíveis está à frente da compreensão agronômica, análise econômica ou métodos confiáveis de aplicação prática.

Dampney & Moore (1999) insistiram em que uma relação de trabalho mais próxima é necessária entre cientistas agrícolas e produtores de tecnologia. As novas tecnologias devem satisfazer as exigências do usuário final agrícola e devem ser sustentadas por pesquisas agronômicas, a fim de gerar confiança ao usuário. De modo semelhante às pesquisas necessárias, os autores listam os seguintes desenvolvimentos necessários quanto à tecnologia:

- sistemas simples e que integrem as bases de maquinaria e escritório, possibilitando o uso fácil e rápido para administradores e operadores;
- programas computacionais amigáveis para manipulação de dados espaciais e com uma capacidade analítica que forneça um sistema de suporte à decisão na própria propriedade rural (*on-farm*);
- padrões de compatibilidade universal entre fabricantes e maquinário; e,
- tecnologia de sensores para coleta de dados de solo, cultura ou outros, de forma econômica e automática.

4.2 Variabilidade espacial dos fatores de produção

O tratamento localizado, que é o objetivo final da agricultura de precisão, não é, exclusivamente, uma conseqüência direta da utilização de equipamentos dotados de sensores, sistema de posicionamento e sistemas computacionais de controle de aplicação de insumos. Antes, é a integração destes e outros sistemas na geração, análise e utilização de informações que refletem a variação que pode ser tratada de forma localizada. Nesse sentido, são relevantes os recursos geoestatísticos para análise da variabilidade espacial, os sistemas e sensores de mapeamento da produtividade, os sistemas de informação geográfica (SIG) e o sistema de posicionamento global (GPS).

Para a agricultura de precisão, o produtor necessita saber como o solo varia dentro do campo. Isto requer um método de amostragem e estimativa diferente daqueles usados tradicionalmente. A variação no interior do campo incluirá desde poucos centímetros até dezenas de metros, sendo desejável solucioná-la com a escala mais ampla para o manejo, o que dependerá da amostragem adequada e de um efetivo método de estimativa (Oliver, 1999).

Em seu trabalho, Dampney & Moore (1999) listaram três categorias principais de fatores que podem causar variabilidade espacial na produtividade ou na qualidade das culturas:

- atributos fixos locais, não facilmente alterados (exemplo: textura e profundidade do solo);
- atributos persistentes locais, que podem ser alterados (exemplo: pH e nutrientes do solo); e,

- fatores estacionais de curta duração (exemplo: clima, doenças foliares e pragas).

Runge & Hons (1999) focalizaram as fontes de variação na produtividade em três categorias primárias: água (condição relativa à precipitação pluviométrica e água armazenada disponível á planta, englobando atributos fixos e fatores estacionais); manejo da fertilidade (o potencial produtivo e os resultados de análises químicas têm sido básicos para a aplicação seletiva de adubo, mas as necessidades de fertilidade do solo, particularmente N, são dependentes do nível de produtividade e/ou da quantidade da precipitação pluviométrica, sendo que a aplicação a taxa variável baseada na produtividade esperada pode ser um equívoco para áreas que historicamente produzem menos por falta de umidade no solo); e, genética (muitos híbridos têm incrementado a produtividade devido à população de plantas mais elevada e não necessariamente a características produtivas individuais). De fato, as fontes de variação podem ser classificadas de muitas formas, mas pelas abordagens anteriores entende-se que a manifestação de uma fonte de variação fixa ou persistente é mais ou menos acentuada dependendo da intensidade de uma fonte de variação estacional, especialmente no que tange às condições climáticas. Esta dependência vale também para uma fonte secundária, como plantas daninhas, que sempre foram um problema em potencial. Hons & Saladino, 1995, citados por Runge & Hons (1999), demonstraram que plantas daninhas reduziram mais a produtividade de milho onde o nitrogênio era limitante do que quando adequadamente suprido. Considerando outros fatores que afetam a produtividade de milho e a agricultura de precisão, como doenças e insetos, Runge & Hons (1999) afirmaram que doenças do milho podem ter efeitos negativos extensos na produtividade, mas os insetos podem ser um problema maior. A pressão e dano de inseto foram também estudados por Karlen et al. (1999), juntamente com os níveis de emergência e crescimento de milho e nutrientes de solo para identificar fatores críticos localizados afetando a produtividade da cultura em um campo de 16 ha em Iowa (USA). A influência das pragas não foi espacialmente correlacionada com a variabilidade na produtividade.

Ao analisar a influência de atributos topográficos na disponibilidade de N do solo e na produtividade de milho, Braum et al. (1999) concluíram pela ausência de influência dos atributos topográficos estudados, os quais não se correlacionaram com a disponibilidade de N do solo ou níveis de produtividade de milho. Segundo os autores, a resposta da cultura não foi estável de uma safra para outra, para um mesmo local, quando a

fertilização com N foi a mesma, o que implica que as respostas observadas para a produtividade da cultura e para o uso do nutriente podem ser exclusivas para as condições climáticas específicas de cada estação de cultivo. Embora a constatação dos autores não pareça fugir do óbvio, ela é muito pertinente quando se pretende adotar aplicações de fertilizantes a taxa variável. Sem conhecer o comportamento do solo diante das mudanças das condições climáticas, provavelmente não se poderá prever a resposta da cultura à mudança da quantidade de nutriente apenas pela resposta de anos anteriores.

Contrariamente a Braum et al. (1999), Timlim et al. (1999), num estudo da curvatura da superfície do solo e variabilidade espaço-temporal da produtividade de milho, concluíram que, pelos resultados obtidos, a topografia e fatores pertinentes como profundidade do solo e drenagem tiveram um grande efeito nas variações da produtividade, sendo estas mais fortemente relacionadas às propriedades do solo relativas à capacidade de retenção de água e drenagem. Ainda assim, os autores relataram que os mapas de produtividade nem sempre sugeriram claras relações temporais da produtividade com as principais posições topográficas, mas áreas com baixa curvatura geralmente exibiram as mesmas posições de baixa e alta produtividade em anos secos ou úmidos, respectivamente.

Clay et al. (1999) avaliaram sistematicamente os requisitos de amostragem de solo em agricultura de precisão. Avaliando o impacto da distância da malha de pontos sobre a análise espacial e a lucratividade, os autores observaram que quando o espaçamento passou para 60m, todos os 4 conjuntos de dados individuais do mesmo campo forneceram semivariogramas similares para alguns atributos de solo (N e C totais e pH) e semivariogramas distintos para P, K e Zn. Os autores afirmaram que a lucratividade pode ser incrementada apenas por entender a variabilidade dos nutrientes e pode não exigir equipamento de adubação a taxa variável ou monitores de produtividade. No seu trabalho, Clay et al. (1999) chamaram a atenção para o fato de que, caracteristicamente, as estratégias de amostragem desenhadas para propósitos de pesquisa podem não ser exeqüíveis para o uso de agricultores. Os autores usaram informações obtidas de amostragem de solo em malha para avaliar a qualidade da informação para propósito de pesquisa e a lucratividade potencial associada a diferentes estratégias de amostragem de solo e de aplicação, num campo de plantio direto com 65 ha em Dakota do Sul (EUA). Numa amostragem de 30 x 30m, foram definidos mais de 650 pontos, que geraram também subconjuntos com grade de 60 x 60m e de 90 x

90m. Segundo os autores, a distribuição do fósforo foi bimodal, com um pico centrado entre 8 e 15 ppm, enquanto o segundo pico foi centrado entre 20 e 30 ppm. Através dos mapas de isolinhas do elemento para os três espaçamentos adotados, percebeu-se que a concentração de fósforo foi influenciada pela localização na paisagem (relevo), embora cada nível de distância exibisse diferentes níveis de continuidade espacial. Ao considerar que o percentual dos vários níveis de fósforo foram similares para os três espaçamentos adotados, apesar da diferença no detalhamento da distribuição ser maior conforme se reduz a distância entre as amostras, os autores ressaltaram que a seleção da malha com a distância mais apropriada deve levar em conta a variância da estimativa do erro da krigagem, bem como a lucratividade esperada.

Doerge & Gardner (1999) descreveram um método de comparação entre dois tratamentos realizados em faixas adjacentes diretamente na área de produção, utilizando monitores de colheita associados ao sistema DGPS para coletar os dados de produtividade de cada tratamento. Com a devida identificação pelo monitor, os dados de cada tratamento puderam ser separados e interpolados para gerar os mapas de produtividade do tratamento para a área toda. A subtração desses mapas, um pelo outro, forneceu o que os autores chamam de mapa de diferenças de produtividade. Neste trabalho, os autores apresentaram um processo de avaliação dos erros contidos no mapa de diferenças de produtividade, onde cada ponto individual de cada um dos tratamentos é comparado com o valor de produtividade estimado a partir das superfícies interpoladas. O resíduo obtido indicaria problemas na interpolação dos dados, irregularidades na velocidade da colhedora, campos estreitos e muito longos com menos de oito pares de faixas de tratamentos, ou campos com presença excessiva de declive entre 2 e 4%. Por outro lado, os autores não esclareceram como a variabilidade espacial, observada no mapa de diferenças, pode ser analisada, bem como os princípios considerados para a decisão a respeito da significância da diferença encontrada entre os tratamentos. Os autores também não consideraram que, em uma área de produção comercial, a diferença na produtividade provavelmente estará vinculada à variabilidade espacial dos outros fatores envolvidos e não controlados, além do próprio tratamento.

Seguindo procedimentos semelhantes aos relatados por Doerge & Gardner (1999), Heiniger & Dumphy (1999) implantaram experimentos de comparação de cultivares/híbridos de soja e milho cujo genótipo apresentavam interações opostas em relação

ao ambiente, em faixas adjacentes, com análise de dependência espacial e krigagem dos dados de produtividade registrados por um monitor de colheita, de modo a produzir mapas como se cada cultivar ou híbrido tivesse sido plantado no campo todo. Para determinar qual cultivar ou híbrido teve o melhor desempenho em diferentes áreas do campo, foram usadas médias móveis e desvio padrão, sendo encontrada uma relação da variação da produtividade de cada cultivar ou híbrido com as condições topográficas.

Fraisse et al. (1999) constataram que em vários estudos têm sido usadas análises estatísticas para melhor entender a relação funcional entre produtividade de culturas e outros fatores espaciais, mas ressaltaram que a produtividade de culturas é função não somente de fatores espaciais, mas também de variabilidade temporal. Para os autores, a variabilidade climática pode inclusive ser mais importante que variabilidade espacial.

Conforme Lark et al. (1999) e em concordância com Kuhar (1997), a investigação da variabilidade espacial deve seguir uma linha ascendente de questionamento, para saber, inicialmente, se há variação substancial nos níveis de produtividade de um campo, e se ela ocorre em escalas espaciais nas quais uma resposta de manejo é exeqüível; ocorrendo uma variação substancial numa escala espacial "tratável", é verificado se a variação na produtividade reflete fatores aos quais a resposta de manejo é exeqüível; e, finalmente, que informação é necessária para manejar a variação neste campo e como ela pode ser coletada de forma mais eficiente e econômica. Concluindo, Lark et al. (1999) ressaltam que o ponto importante é que, uma vez que se esteja investindo em um nível de informação detalhada de solo, haverá confiança que ela é justificada pelo grau e escala de variação produtiva; e que há boa razão para investigar a propriedade particular de solo pela qual se está pagando para ter amostrada e analisada.

4.3 A geoestatística como ferramenta de análise espacial

Segundo Oliver (1999), a variação espacial das propriedades do solo pode ser descrita usando-se a teoria e os métodos geoestatísticos. O semivariograma, sua ferramenta central, fornece uma descrição imparcial da escala e padrão de variação espacial. Ele efetua isto medindo o grau de correlação ou dependência espacial entre os pontos amostrados, baseado na noção de que as propriedades do solo são mais prováveis de serem

similares entre localizações vizinhas do que entre aquelas distantes entre si. Essa ferramenta geoestatística que possibilita a detecção e análise da estrutura e dependência espacial na variação dos atributos, conhecida como variograma (ou semivariograma) e representada por $\gamma(h)$, é apresentada por Isaaks & Srivastava (1989), pela expressão:

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

onde:

n é o número de pares formados, x_i e $x_i + h$ são locais de amostragens separados por uma distância h, enquanto $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ são valores medidos da variável nos locais correspondentes.

Teoricamente, para distâncias tendendo a zero, a semivariância deveria também apresentar valor próximo da nulidade. Entretanto, nos cálculos dos semivariogramas experimentais que apresentam uma estrutura de dependência espacial, o que se verifica é que a semivariância calculada para os diversos intervalos raramente permite um ajuste com uma curva partindo junto à origem do eixo da semivariância. Isso caracteriza o chamado efeito pepita (Co), ou seja, mesmo que sejam considerados pontos muito próximos entre si, haverá uma variação, entre os respectivos valores, que independe da distribuição espacial das amostras. Ao descrevê-los, Oliver (1999) afirmou que os semivariogramas geralmente são limitados, ou seja, a curva que ilustra a semivariância atinge uma assíntota conhecida como patamar (C + Co). Este momento registra a amplitude da correlação ou dependência espacial dos dados, ou seja, a distância até onde se percebe alguma continuidade entre os valores medidos. A partir da estabilização da curva do semivariograma, espera-se que o nível de semivariância registrado esteja próximo da variância de todo o conjunto de dados. A diferença entre o nível da semivariância definida pelo patamar e a semivariância inicial, representada pelo efeito pepita, é identificada como a contribuição da variância estrutural (C). A distância que vai da origem do semivariograma até o momento em que ele se estabiliza é denominada de alcance (a). Logo, pontos separados por distâncias menores que essa faixa são espacialmente correlacionados, mas aqueles separados por distâncias maiores que este alcance são independentes entre si. É o montante da semivariância que efetivamente é relacionado com a disposição espacial das amostras. Quando a curva tem uma inclinação inicial acentuada, isso

mostra que os dados são espacialmente dependentes, mas que essa continuidade da propriedade enfraquece rapidamente com o aumento da distância entre os pontos. Por sua vez, uma inclinação mais suave, para um mesmo patamar de variação, expressa uma dependência espacial mais consistente, pois a continuidade entre os valores mantêm-se presente até distâncias mais longas. Segundo Oliver (1999), os semivariogramas limitados pelo patamar sugerem que os valores têm uma distribuição regionalizada, com algumas áreas possuindo valores altos e outras com valores menores. E indicam também que toda a variação nesse nível de resolução foi englobada pela amostragem. A Figura 1 ilustra a presente descrição.

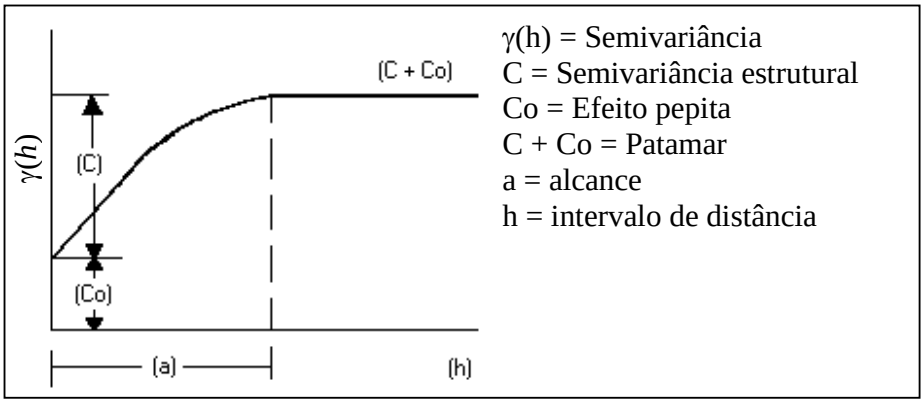


Figura 1. Semivariograma esquemático

Quando o semivariograma não apresenta uma curva que tende a se iniciar em valores mais baixos de semivariância e exiba uma inclinação positiva com o avanço da distância, até atingir o patamar, ele representa uma situação onde não há dependência espacial aparente nos dados. Ou seja, a variação representa uma somatória de fatores envolvidos no processo sem correlação com a distância entre as amostras. Para atributos que apresentam continuidade, tais como os atributos do solo, isto usualmente significa que a amostragem falhou na tentativa de desvendar a variação presente na escala de investigação. Nestas condições, tais dados são impróprios para qualquer forma de interpolação para a qual os dados devem correlacionar-se espacialmente (Oliver, 1999). A geoestatística foi a ferramenta utilizada, entre outros autores, por Nollin et al. (1999) e Selles et al. (1999), para detectar padrões de variabilidade espacial de atributos de solo.

Entretanto, de acordo com Goovaerts (1999), a descrição de padrões espaciais raramente é um objetivo por si só. Geralmente o que se objetiva é beneficiar-se da

existência de dependência espacial para estimar propriedades do solo em locais não amostrados. Um passo importante entre a descrição e a estimação é a modelagem da distribuição espacial dos valores do atributo. Segundo o autor, é ainda controverso o modo como estes modelos são escolhidos e estimados os seus parâmetros (alcance, patamar). Os métodos de ajuste abrangem procedimentos automáticos de mecanismos desconhecidos, ajustes visuais e ajustes semi-automáticos, quando a escolha e a adequação do ajuste de um modelo particular é baseada num critério estatístico, tal como a soma de quadrados das diferenças entre valores do modelo e do semivariograma experimental. Para Goovaerts (1999), procedimentos "caixa preta" deveriam ser evitados, ao passo que, o fato de usar um critério estatístico pode reduzir a modelagem do semivariograma a um exercício de ajuste de uma curva a valores experimentais, o que o autor considera restritivo demais. Complementando, o autor afirma que o objetivo da análise estrutural é construir um modelo permissível que capture a maior parte das feições espaciais do atributo, lembrando que informações complementares podem ser importantes neste processo. De qualquer forma, o modelo mais complicado normalmente não conduz a estimativas mais precisas.

A krigagem é o método de interpolação em geoestatística, onde a krigagem ordinária é o tipo mais usado comumente. Ela é um estimador linear ponderado, onde os pesos são derivados usando-se o semivariograma, e pela minimização da variância de estimação. Kravchenko & Bullock (1999) ressaltaram que a escolha da melhor técnica de interpolação para estimar propriedades do solo em locais não amostrados representa um importante princípio na agricultura de precisão, realçando em seu trabalho o melhor desempenho da krigagem em relação ao inverso da distância para estudos com P e K.

Vieira (2000) destacou que o relacionamento entre dois atributos, e as posições que eles ocupam no espaço, pode ser estudado através de semivariograma cruzado. Existindo correlação espacial entre duas variáveis, a estimativa de uma delas pode ser feita usando informação de ambas, expressa no semivariograma cruzado, através do método conhecido por cokrigagem. Foi salientado ainda que não importa que uma variável apresente um conjunto de dados muito maior que a outra, pois o semivariograma cruzado só será calculado usando as informações existentes para posições geográficas coincidentes, que devem ser identificadas pelo programa que vai executar a operação, ao mesmo tempo em que são excluídas do cálculo as informações excedentes.

Para Goovaerts (1999), as informações de características de solo são geralmente multivariadas e a geoestatística é usada de maneira crescente para investigar como a correlação entre duas propriedades varia no espaço. A medida da variação conjunta de dois atributos contínuos Z_i e Z_j é o semivariograma cruzado experimental:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{n} [Z_i(x_i) - Z_i(x_i + h)][Z_j(x_i) - Z_j(x_i + h)] \qquad (2)$$

onde:

n é o número de pares formados, x_i e $x_i + h$ são locais de amostragens separados por uma distância *h*, enquanto $Z_i(x_i)$ e $Z_i(x_i + h)$ e $Z_j(x_i)$ e $Z_j(x_i + h)$ são valores medidos das duas variáveis analisadas nos locais correspondentes. Em outras palavras, observa-se a variação conjunta de gradientes de valores de Zi e Zj de um local a outro com um vetor de distância h. Se ambos atributos são positivamente relacionados, um aumento em Z_i da posição x_i para $x_i + h$ tende a ser associado com acréscimo em Z_j para os mesmos locais, e então o valor do semivariograma cruzado é positivo.

4.4 Sistemas de Informação Geográfica

Um Sistema de Informação Geográfica (SIG) é constituído por um conjunto de módulos computacionais destinados à aquisição, armazenamento, recuperação, transformação e saída de dados espacialmente distribuídos. Estes dados geográficos descrevem objetos do mundo real sob três aspectos: a) seu posicionamento com relação a um sistema de coordenadas; b) seus atributos; e c) as relações topológicas existentes. Ou seja, é possível trabalhar com dados dos quais se conhece a posição geográfica, o valor da característica naquele ponto e a sua estrutura de relacionamento espacial como a vizinhança, proximidade e pertinência entre objetos geográficos (Burrough, 1986). Alguns exemplos de utilização de SIG (Assad, 1995; Formaggio et al., 1992) atestaram sua viabilidade para estudos de problemas ambientais. É uma ferramenta intimamente relacionada com a prática da agricultura de precisão.

Kuhar (1997) mencionou que computadores velozes, e poderosos programas gráficos e de manipulação de informação, são tecnologias que estão tornando a agricultura de precisão uma realidade. Nela, atividades como monitoramento de produtividade, inspeções da cultura ou amostragem regionalizada de solos fornecem dados a respeito da variação da cultura e das condições do solo através do campo. Estes dados devem então ser processados em mapas para fornecer informações úteis. Em concordância a isto, Pierce & Nowak (1999) argumentaram que, pelo fato da agricultura de precisão ser relacionada com a variabilidade espacial e temporal, e porque ela é baseada em informação e focada em decisão, a capacidade de realizar análises espaciais de um SIG é que viabiliza a agricultura de precisão. Segundo os autores, essa afirmação é verdadeira porque o valor da agricultura de precisão é percebido somente quando uma informação resultante é introduzida numa decisão de manejo que aumenta a rentabilidade, traz benefícios ao meio ambiente ou agrega algum outro valor ao produto.

Na agricultura de precisão, um enorme volume de dados é coletado durante as atividades (no monitoramento da cultura, por exemplo, os dados podem ser coletados a cada segundo). Programas computacionais que podem facilmente armazenar, manipular e exibir estes dados são uma importante ferramenta para a operação de agricultura de precisão, pois permitirá a formação da base de dados da propriedade. No caso do SIG, a base de dados contém dados geográficos, que são formados pelo valor do atributo sendo descrito e a sua respectiva localização espacial.

Na definição de Kuhar et al. (1997), um dado espacial que pertence a uma posição na superfície da terra é chamado um dado georreferenciado, e pode estar associado a um dos diversos sistemas de coordenadas existentes. O georreferenciamento dos dados, usando um sistema local de referência (partindo de um ponto conhecido, definido como coordenada 0,0 e medindo as distâncias em metros), pode ser usado em áreas pequenas. É importante que se conheça e disponha de programa capaz de converter os sistemas de referência de fontes de dados diferentes para um sistema de referência único, que permita sobrepor todos os dados de cada posição geográfica, viabilizando a sua análise.

As ferramentas de análise disponíveis em um SIG, ou programas específicos de agricultura de precisão, são os instrumentos de exploração das informações contidas nos mapas de produtividade e nos demais mapas que possam ser gerados nas

atividades de agricultura de precisão. Conforme Pierce & Nowak (1999), a habilidade para executar operações espaciais sobre os dados distingue um verdadeiro SIG de muitos programas computacionais que fazem mapeamento temático e gerenciamento de banco de dados. A combinação dos dados é fundamental para identificar e localizar as associações entre as causas e possíveis efeitos da variabilidade espacial, bem como sua magnitude de influência e de ocorrência no campo. A interpretação e manipulação dos dados através de um SIG são os passos intermediários para a obtenção dos mapas de tratamento, sendo utilizados, segundo Legg & Stafford (1998), como entrada de dados para um sistema de controle que dirige o mecanismo de aplicação variável, juntamente com um sistema de navegação. Entretanto, Kuhar (1997) salientou que um SIG é uma ferramenta muito poderosa, mas o usuário inexperiente pode facilmente gerar resultados enganosos. A despeito de quem gera os mapas, o conhecimento do processo auxiliará na interpretação mais precisa da informação. Segundo o autor, quem avaliará os mapas (o produtor ou um profissional que dá assessoria) deve ter um amplo conhecimento do histórico e da situação do campo, tais como problemas de colheita, de plantio, linhas de cerca antigas, estradas, construções, canais de drenagem, entre outros. Muitas feições em um mapa de produtividade podem ser relacionadas a esses fatores, e não à fertilidade ou aos insumos manejáveis. Assim, um avaliador que não conhece nada deste histórico poderia incorrer grosseiramente numa duvidosa interpretação dos mapas.

4.5 Sistema de posicionamento global

Entre as tecnologias para agricultura de precisão descritas em seu trabalho, Legg & Stafford (1998) ressaltaram que o Sistema de Posicionamento Global americano (GPS, sistema NAVSTAR), baseado numa constelação de 24 satélites, é quase universalmente utilizado como um sistema de posicionamento para agricultura de precisão (embora o sistema russo GLONASS esteja encontrando alguma aplicação). Segundo Soares (1998), o GPS, como sistema posicionador, está disponível para uso desde o final da década passada. Porém, somente em meados de 1994 é que, efetivamente, o sistema esteve pronto para o uso integrado em geoprocessamento.

A resolução de posição requerida depende da operação em consideração, variando de cerca de 30m para aplicação variável de fertilizante até abaixo de 0,1m para linha de plantio da cultura. Para levantamentos localizados ou estabelecimento de

uma malha de amostragem dentro de um campo, a recepção e definição da posição geográfica pode ser computada repetidamente em modo estático para reduzir o erro. Entretanto, segundo Legg & Stafford (1998), o posicionamento de máquinas no campo requer resolução fidedigna em modo dinâmico, possivelmente com atualizações a cada 0,5 segundos (sinal com correção diferencial - DGPS).

Para Pierce & Nowak (1999), a tecnologia GPS possibilita a prática da agricultura de precisão porque todas as suas fases utilizam informação de posicionamento. O Departamento de Defesa Americano implementou a disponibilidade seletiva (código SA) em 25 de março de 1990, o qual limitou a precisão do GPS, para uso civil, em torno de 100m, até 1° de maio de 2000, quando foi retirado, permitindo que a acurácia assumisse valores em torno de 10m. Esta limitação da precisão havia sido efetuada pela variação no tempo preciso dos relógios a bordo dos satélites e pelo fornecimento de dados de posicionamento orbital incorreto (NAPA, 1995, citado por Pierce & Nowak, 1999). Esse limite, mesmo após a retirada da disponibilidade seletiva, tem sido superado pela adoção de correção diferencial (DGPS) transmitida por rádio ou satélite. Para os autores, a correção diferencial é desejável até sem o SA, porque é preciso atingir a acurácia necessária em alguns aspectos de agricultura de precisão, como navegação e alinhamento.

Embora produtores rurais e prestadores de serviço necessitem de uma informação de DGPS confiável, eles ainda experimentam interrupções e interferências no sinal do GPS ou no sinal de correção diferencial, criando falhas em dados coletados seqüencialmente, ou perda de controle de aplicação ou de alinhamento. A disponibilidade do sistema NAVSTAR especificada (com pelo menos quatro satélites à vista em qualquer localização) é de 99,85%, com uma confiabilidade (o sistema está em serviço quando ele necessita estar) de 99,97%, conforme NAPA (1995), citado por Pierce & Nowak (1999). Entretanto, salientam os autores, a adequação da geometria dos satélites para calcular uma solução de posicionamento, referida como diluição da precisão (DOP), é um problema em agricultura, onde estruturas naturais ou fabricadas obstruem a visão de alguns satélites pelo receptor GPS ou interferem na recepção da correção diferencial. Há também localizações geográficas nas quais essa geometria tem sido inadequada para a necessária precisão de posicionamento em certos períodos durante o dia. Adicionalmente, Pierce & Nowak (1999) atestaram que alguns receptores de sinal GPS são suscetíveis a interferência de sinais

indesejáveis, oriundos de uma variedade de fontes, incluindo maquinaria agrícola, tornando o receptor inútil em navegação ou posicionamento.

Johannsen et al. (1999) relataram que os produtores rurais já têm serviços disponíveis que envolvem dados de satélites, transmissão local de informações e fornecimento de dados a partir de uma variedade de fontes (sensores sobre tratores, colhedoras ou outros equipamentos, sensores sobre aeroplanos para auxiliar em levantamentos da cultura, recepção ou análise de informações de satélite). Os autores salientaram ainda que outras tecnologias estão também envolvidas para tornar bem sucedidas a coleta de dados, a análise e a interpretação (SIG para aquisição de dados e informações adicionais, como mapa de solos ou modelo numérico de terreno, de modo a apoiar a análise de dados de sensoriamento remoto, GPS para locar observações de campo de modo a que o computador possa associá-los a outros dados, e incrementos nas comunicações, tais como a internet para transmissão de informações e outros conjuntos de dados).

4.6. Mapas de produtividade

Para Willis et al. (1999), os monitores de produtividade conjugados com GPS são um dispositivo relativamente novo disponível para os produtores.

O Mapeamento da produtividade é um processo de registro de fluxo de grão, através do mecanismo de colheita da máquina, ao mesmo tempo em que é registrada a localização no campo. Segundo Dampney & Moore (1999) numa certa colhedora comercial, as medidas são tomadas aproximadamente a cada 3 segundos, resultando em mais de 500 pontos por ha. Técnicas de interpolação são usadas para gerar o mapa de produtividade, usualmente na forma de linhas de contorno preenchidas por cores. Conforme os autores, o mapeamento da produtividade é geralmente aceito como o ponto de entrada em agricultura de precisão.

Segundo Willis et al. (1999), quando os produtores observam mapas de produtividade, eles estão olhando para padrões e tendências gerais, tais como áreas de produtividade extraordinariamente alta ou baixa. Uma vez que estas áreas forem identificadas, consideram os autores que seria então tarefa do produtor, o qual é mais familiarizado com os solos e a história do campo, tentar deduzir por que estas variações estão ocorrendo.

Acrescentam ainda que, se o conhecimento das características dos solos e do histórico da área permitirem ao agricultor lançar a hipótese de um fator que esteja limitando a produtividade, algumas ações poderiam então ser tomadas para manejar as áreas de baixa produtividade de modo diferenciado, a fim de obter-se um melhor rendimento destas áreas. Os mapas de produtividade, ainda segundo os autores, atendem às necessidades dos agricultores como descrito acima e são desenhados para ser prontamente compreensíveis e visualmente agradáveis, mas, para pesquisa científica, os métodos de coleta de dados são deficientes. Para Willis et al. (1999), os dados brutos do monitor de colheita embutem alguns erros inerentes, os quais precisam ser entendidos, a fim de se obter o conhecimento suficiente para corrigi-los da melhor forma possível.

Zhang et al. (1999), estudando a aplicação de imagens aéreas digitais para monitorar e prever a produtividade potencial de milho e soja, consideraram que a qualidade dos dados de um monitor de produtividade depende da variação da topografia e de quão uniformemente a colhedora é dirigida, uma vez que os dados de produtividade são registrados como uma taxa de fluxo de massa, a intervalos regulares e muito reduzidos. Analisando resultados de correlações, os autores afirmaram que há uma hipótese geral de que a produtividade é função da variação dos nutrientes de solos em adição aos fatores ambientais. Portanto, uma correlação entre produtividade e nutrientes de solo era esperada. Entretanto, com os dados estudados, não foi encontrada relação espacial direta entre produtividade e nutrientes, bem como entre nutrientes do solo e índice de vegetação normalizado (NDVI). Para os autores, este resultado pôde ser devido à qualidade dos dados de solo e às escalas espaciais inconsistentes das 3 fontes de dados (produtividade, imagens aéreas e nutrientes do solo). Os autores salientaram ainda que, uma vez que as condições ambientais e os nutrientes do solo variam de um campo para outro, uma regressão linear desenvolvida a partir de uma condição de produção não é adequada para prever a produtividade para outros campos. Entretanto, desenvolver este tipo de relação em múltiplos campos poderia prover os produtores com informação para manejo localizado.

O sistema mais comum para medir o fluxo de grão através da colhedora é a medida de massa. Outros sistemas adotam métodos volumétricos de medidas, mas estes são incapazes de compensar automaticamente as variações na densidade do grão (Dampney & Moore, 1999).

A produtividade de uma cultura é normalmente tratada em termos de unidade de peso por unidade de área colhida para um teor de umidade específico. Conforme Kuhar (1997), os monitores instantâneos de produtividade fazem a medição enquanto os grãos são colhidos. Os pontos de dados são continuamente coletados enquanto a colhedora opera. Quando o monitor de produtividade é associado a um sistema de posicionamento global com correção diferencial (DGPS), o sistema é capaz de gerar o mapa de produtividade para a área colhida, exibindo a produtividade para cada local do campo.

Ainda segundo Kuhar (1997), os monitores de produtividade fornecem uma medida relativamente precisa da produtividade em uma faixa ou uma linha de corte ou um campo. Porém, devido ao próprio processo de colheita e da medição indireta da produtividade, é mais seguro confiar na informação do mapa de produtividade como um todo do que em cada uma das frações que o compõem, pois, embora a calibração ajuste as medidas feitas pelo monitor de acordo com medidas pesadas na faixa ou campo, isto não certifica que qualquer ponto tomado isoladamente seja inteiramente preciso. Além disso, ressalta o autor, cada fração ou ponto do mapa de produtividade está associado a uma área que corresponde à largura de corte multiplicada pelo espaço percorrido pela colhedora a cada intervalo de registro de dados, conforme a sua velocidade de deslocamento.

Analisando esta questão, Willis et al. (1999), afirmaram que há muitos erros intrinsecamente associados aos dados de um monitor de colheita, os quais necessitam ser considerados ao se fazer uso destes dados para pesquisa científica. Os erros incluem defasagem de tempo da cultura desde a alimentação até o sensor de produção, calibração do sensor de produção, precisão do GPS, incerteza quanto à faixa de cultura entrando na plataforma, grãos em massa, perda de grãos e muitos outros não listados (Blackmore & Marshall, 1996, citados por Willis et al., 1999). A defasagem, associada com a latitude e longitude registrada para a medida de produção da cultura desde a alimentação até alcançar o sensor de produção, segundo os autores, foi o maior problema encontrado ao correlacionar produtividade aos "*pixels*" correspondentes na imagem hiperespectral. A maioria das indústrias de monitor de produtividade adota um tempo básico de 12s. Este número, conforme Willis et al. (1999), foi determinado, um tanto arbitrariamente, como a defasagem média de tempo. Ele será maior ou menor em função de um vasto conjunto de operações e variáveis de

campo, e pode valer de 8 a 30s, dependendo de quão pesada é a produção e da velocidade desenvolvida pela colhedora.

Stafford et al. (1996) afirmaram que onde a velocidade do fluxo de material colhido é constante, como na saída de grãos de uma colhedora de grãos pequenos, um sensor de concentração de sólidos pode ser calibrado em termos de taxa de fluxo de massa. Dois importantes critérios definem que o sensor deveria apresentar impedância mínima para o fluxo de grãos e que deveria ser insensível a vibrações mecânicas transmitidas através da estrutura da máquina. Um sensor baseado em capacitância elétrica, conforme os autores, poderia ser construído para satisfazer os referidos critérios.

Em outro trabalho, Stafford et al. (1997) descreveram um método de medir a largura de corte real, que na opinião deles é uma das mais significativas fontes de erro na geração de mapas de produtividade. Dois dispositivos ultrassônicos de medida de distância foram ajustados à plataforma da colhedora. O princípio de operação é a medida do eco de pulso, ou seja, a defasagem de tempo entre a transmissão e o recebimento do pulso emitido pelo mesmo dispositivo é proporcional à distância entre o dispositivo e a superfície que refletiu o sinal. Segundo os autores, o uso de sensores de largura de corte aprimorará a precisão de medidas contínuas de produtividade.

Broos et al. (1999) relatam o desenvolvimento de um sensor de fluxo de massa para cana-de-açúcar, com calibração e determinação de precisão no campo. Para compor o mapa de produtividade, os dados de fluxo de massa foram registrados juntamente com a velocidade de deslocamento e a posição da recolhedora (a cana havia sido cortada por outro equipamento). Conforme os autores, o sensor de fluxo de massa para cana-de-açúcar foi usado para mapear a colheita de 7,2 ha na Bélgica, e que, para isso, foi necessário efetuar uma média móvel no intervalo de 8s e eliminar os dados com produtividade extremamente alta ou baixa (os autores não indicam os critérios para identificar e eliminar estes valores). Afirmam ainda que estes erros (para mapeamento, não para produção total) foram causados por velocidades de deslocamento extremamente lentas ou a “mudança de tempo” (*time shift*), que foi causada pela colheita em dois estágios. A recolhedora de cana-de-açúcar foi equipada com um sistema para coletar colmos ao redor de 5m no começo e no fim das linhas. Isto causou produtividade extremamente alta nas cabeceiras das linhas.

Fabricantes de sensores de produção defendem uma precisão de ±2%, baseados em testes conduzidos sobre cargas em batelada. Entretanto, ressaltam Dampney & Moore (1999), a precisão destes testes não fornecem dados da capacidade do sensor para medir o fluxo de grão instantaneamente, o que seria uma condição fundamental para um sistema de mapeamento da produtividade. Os autores afirmam que erros significativos podem existir em mapas de produtividade, principalmente devido à operação da colhedora usando as configurações padrões especificadas pelo fabricante. Moore, 1997, citado por Dampney & Moore (1999), identificou erros devido a direção, intervalo e tempo de resposta para ajustes da produção, além de preenchimento incompleto da plataforma. Para os autores, estes erros podem causar impressões enganosas de baixa produtividade, particularmente em áreas de manobras. Embora reconheçam que esses erros possam ser reduzidos durante a interpolação, devido ao efeito de compensação propiciado pelos dados corretos adjacentes, o inverso também pode ocorrer, ou seja, as áreas de dados errôneos podem contribuir para uma estimativa menos precisa na estimativa de valores das áreas corretas, se fizerem parte do número de vizinhos usados para o cálculo dessa estimativa. Complementando, Dampney & Moore (1999) salientaram que, quando operados corretamente, os sistemas de mapeamento da produtividade fornecem dados que podem ajudar a aprimorar a produção como um todo e o cultivo agrícola, e que, infelizmente, muitos produtores não têm se importado com a operação cuidadosa da colhedora, de modo que muitos mapas existentes contêm erros significativos.

Nielsen et al. (1999) questionaram a capacidade dos pesquisadores de solo e planta de prever e alcançar os padrões espaciais de produtividade, por carecer ainda de conceitos e estratégias para interpretar as causas dos padrões espaciais, embora fazendo uso das sofisticadas tecnologias atuais. Por outro lado, Lark et al. (1997a) constataram que tem havido um crescente interesse em sistemas de mapeamento da produtividade para culturas mecanizáveis, a fim de obter informações a respeito da variabilidade espacial no interior dos campos. É esperado que, eventualmente, essa informação possa ser usada para determinar taxas espacialmente variáveis para insumos, tais como fertilizantes. Entretanto, os autores salientaram que, no nível de conhecimento existente, até o momento de realização do trabalho, não poderia ser atestado confiavelmente quais os níveis de variação da produtividade serviriam como indicadores para o manejo localizado e até mesmo qual seria a resolução espacial necessária para registrar adequadamente esta variação no mapa de produtividade. Os

resultados sugeriram que não se pode esperar que dados de fluxímetro decomponham variações de produção detalhadas sobre intervalos espaciais inferiores a cerca de 15m, enquanto 20m a 25m pode ser uma escala de resolução mais realista. Complementando o exposto, os autores afirmam que diferentes colhedoras, velocidades, regulagens e culturas podem dar resultados diferentes.

Em estudos posteriores, Lark et al. (1999), partindo do pressuposto que todo campo mostrará alguma variação de solo, admitiram que a variação espacial em alguns campos pode ser muito complexa, enquanto que em outros campos ela ocorre em escalas espaciais nas quais são mais claras quanto ao mapeamento e manejo. Em alguns casos, pode ser decidido não proceder com planos para manejo localizado em resposta aos fatores de solo, caso a variação espacial seja limitada, ou muito intrincada. Em outros casos, a escala espacial da variação da produtividade indicará o provável nível de esforço de campo necessário para solucionar a variabilidade natural do solo.

Apesar de reconhecer a possibilidade de detectar e manejar a variabilidade de muitos atributos, como produtividade e qualidade da cultura, tipo de solo e nutrientes, plantas daninhas, pragas e doenças, Dampney & Moore (1999) afirmaram que o mapeamento confiável e não oneroso desses atributos apresenta muitos desafios. Embora mapas de produtividade confiáveis possam ser produzidos, outros atributos mapeados por sistemas comerciais de mapeamento nem sempre oferecem a mesma confiabilidade. A base dos levantamentos destes atributos pode ser inadequada para dar suporte à forma detalhada como os resultados são apresentados aos produtores rurais. Por exemplo, o mapeamento de isolinhas de pH e nutrientes do solo é geralmente baseado em amostras de solo tiradas sobre uma malha de 100m, com mapas gerados a partir de programas de interpolação estatística. Sob este aspecto, os autores ressaltaram ainda que, quando se utilizou análise geoestatística, alguns resultados mostraram que, geralmente, são necessários intervalos de amostragem entre 40 e 60m, para que se obtenha mapas confiáveis de pH e alguns nutrientes do solo. Complementando, Dampney & Moore (1999) afirmaram que, embora a amostragem intensiva possa ser custosa, devem ser reconhecidos os perigos de alguns mapas interpolados, que exibem uma apresentação agradável, mas são potencialmente enganosos, pois foram produzidos a partir de dados insuficientes. O significado de ter informações perdidas em função de amostragem a espaçamentos mais largos, bem como o mérito da amostragem

inteligente em predeterminadas zonas do campo, baseada em fatores tais como tipo de solo, topografia e padrões de crescimento e produtividade, são questões relevantes e que devem ser analisadas.

Conforme é exposto por Lark et al. (1997b), a tecnologia de mapeamento da produtividade tem sido disponibilizada comercialmente há vários anos. Entretanto, a interpretação destes dados é ainda um tanto fragmentada. Os autores argumentaram que, se o potencial do mapeamento da produtividade é ser completamente esclarecido, então é necessário estabelecer um procedimento para uma interpretação mais compreensível dos mapas de produtividade. Neste sentido, dados de produtividade e de amostras regionalizadas de solo têm sido utilizados por diversos autores para estudar a correlação entre a variabilidade de propriedades do solo e a produtividade de culturas (Cox & Wardlaw, 1999, Khakural et al., 1999, Coelho et al., 1999, Johnson et al., 1999).

Em seu trabalho, Lark et al. (1997b), enumeram três problemas gerais com que se depara o profissional que pretende interpretar esses mapas. O primeiro é distinguir múltiplas causas de variação. O segundo problema é a fraca consistência entre mapas de produtividade de safras sucessivas: mapas de produtividade serão úteis somente na medida em que informações a respeito de fatores intrínsecos do campo puderem ser extraídas (ao contrário de efeitos efêmeros, tais como doenças transmitidas pelo vento). Entretanto, observa-se, em estudos de Lark & Stafford (1997) e Stafford et al. (1996), nos quais a mesma cultura foi cultivada por alguns anos, que a correlação da produtividade entre safras sucessivas nos pontos ao longo do campo é baixa (tipicamente $< 0,2$). Finalmente, há o problema da sobrecarga de dados: um mapa de produtividade contém uma porção de dados. Porém, dados brutos não são o mesmo que informação. Há a carência de um procedimento para manipular múltiplos conjuntos de mapas de produtividade e extrair, a partir deles e de maneira apropriada, informações generalizadas a respeito do campo, não obscurecidas pela variação exibida pelos mapas de produtividade. Em concordância a esta hipótese, Lark et al. (1999) afirmaram que a análise de uma seqüência de mapas de produtividade pode ser usada para subdividir um campo em regiões, as quais correspondem aos distintos padrões de variação da produtividade de uma safra para outra. Há alguma evidência que tais regiões correspondem a diferentes limitações potenciais na produtividade de culturas dentro de um campo (ex.: solos com déficit hídrico prolongado, solos rasos ou áreas com altas populações de plantas

daninhas). Se este for o caso, então o problema de coletar informação de solo sobre um campo pode ser reduzido ao problema de identificar diferenças importantes entre um limitado número de sub-regiões.

Segundo Ferguson et al. (1999), a estratégia de definição de zonas de manejo para tratamento a taxa variável (VRT) tem incluído alguns aspectos de tipo de solo combinados com outras medidas de produtividade tais como declividade ou níveis de fertilidade. Os autores citam outras propostas de definição de zonas de manejo, listadas em seu trabalho:

- De acordo com a produtividade esperada, baseados na diferença de produtividade de um ou dois anos anteriores;
- Divisão de alguns campos em sub-regiões, baseado em variações do tipo do solo, produtividade, topografia, fotos aéreas, experiência dos produtores, definindo a exigência de adubação pela amostragem do solo em cada sub-região; e,
- Conforme a profundidade do solo.

Mulla & Bhatti, (1997) avaliaram o uso de mapas de produtividade, teor de matéria orgânica e condição de fertilidade do solo para determinar a adubação variável com N em trigo de inverno. Eles sugeriram que devido aos custos e ao trabalho requerido para determinar a condição espacial da variabilidade do solo, o teor de matéria orgânica (obtido remotamente por sensor) e a produtividade de grãos aparentaram ser os critérios mais práticos para dividir o campo em unidades de manejo. A técnica de agrupamento multivariado (*multivariate clustering*) foi usada por Lark et al. (1997b), para analisar uma seqüência de mapas de produtividade de três campos experimentais. Distintos agrupamentos puderam ser reconhecidos, correspondendo a diferentes padrões de variação na produtividade entre anos agrícolas subseqüentes. Em dois campos, nos quais havia dados complementares apropriados disponíveis, foi visto por eles que a variabilidade espacial de certas propriedades do solo eram significativamente associados com a distribuição espacial dos agrupamentos. Ao efetuar a classificação de mapas de produtividade, Stafford et al. (1999) utilizaram o índice NCE (*normalised classification entropy*), proposto por McBratney & Moore (1985), para determinar a distinção dos agrupamentos identificados na classificação, quando o número de classes que apresentava o menor NCE era selecionado. Segundo os autores, um número

arbitrário de agrupamentos seria selecionado (usualmente 4) se o NCE declinasse exponencialmente, indicando uma evidência mais fraca de agrupamento dos dados.

Os dados do mapa de produtividade de cana-de-açúcar obtidos por Broos et al. (1999) foram comparados com os dados do mapa de cevada de inverno do ano anterior, quando somente uma pequena correlação foi encontrada (r = 0,29). Dentro do campo, entretanto, puderam ser distinguidas diferentes zonas no mapa de cana-de-açúcar, as quais apresentaram produtividade consistentemente alta, média e baixa. Nesse último caso, a produtividade foi limitada pelo tipo de solo, compactação e sombreamento por árvores ao longo da bordadura. Foi reconhecido que mapas de produtividade sozinhos não fornecem informações suficientes para se tomar decisões em agricultura de precisão, embora sejam as primeiras indicações para distinguir manchas de comportamento no campo. Zonas com as mesmas características podem ser distinguidas com base nos mapas de produtividade e topográficos, de tal forma que as análises de solo podem ser reduzidas. Diferentes fatores, entretanto, participam na composição de uma produtividade. Assim, não se pode usar um único mapa de produtividade de grãos para indicar estas diferentes zonas em um campo. Para distinguir estas zonas, é necessário examinar não somente a variabilidade espacial, mas também a variabilidade temporal da produtividade da cultura ou das propriedades analisadas. Calculando a correlação de níveis de produtividade anteriores de cevada para a mesma área de produção de cana-de-açúcar, os autores obtiveram correlações muito baixas, quando comparadas com correlações mais elevadas relatadas para uma rotação de aveia e cevada por 4 anos. Entre as razões dessa diferença, os autores citaram o fato deles terem comparado duas culturas completamente distintas (cana-de-açúcar e cevada), as quais podem reagir diferentemente à variabilidade espacial do solo. Além disso, os períodos de crescimento das culturas são diferentes, com maior oscilação das condições climáticas para a cultura de ciclo maior. Outra razão pode ter sido o fato dos atributos limitantes à produtividade no campo estudado serem menos persistentes que em outros campos, como profundidade do solo ou mudanças texturais.

O uso de mapas de produtividade para determinar o potencial produtivo, segundo Lütticken (1999), suscita a questão de quantos anos de dados são requeridos, sem que haja ainda uma resposta definitiva para ela. Em seu estudo, Lütticken (1999) afirmou que os resultados sugerem 2 a 3 anos de mapeamento de produtividade para

que informações relevantes possam ser obtidas sobre potencial produtivo, citando resultados semelhantes relatados por Jürschik & Schmerler, 1995, e resultados opostos relatados por Murphy et al., 1994, os quais afirmaram, respectivamente, a necessidade de 2 a 3 e 7 a 10 anos de mapeamento de produtividade para usar essa informação na definição de taxas variáveis de aplicação de fertilizantes. Ainda conforme Lütticken (1999), a análise temporal de dados de produtividade a partir de uma única rotação de cultura fornece principalmente informação qualitativa sobre diferenças relativas no interior de um campo, ao passo que dados de pelo menos duas rotações de cultura podem ser considerados como uma base de dados confiável, também para quantificar o potencial de produtividade localizada de diferentes culturas e até variedades. A identificação do potencial produtivo por meio de mapeamentos da produtividade deveria ser aplicada principalmente para campos onde os mapas de levantamento de solos não podem ser usados, em virtude de baixa variação dos atributos de solo. Finalizando, foi confirmada a necessidade de um período maior de acúmulo de dados, quando o propósito é utilizar o mapeamento de produtividade para definir a aplicação localizada de fertilizantes.

Segundo Broos et al. (1999), para cada região com um diferente potencial de agrupamento, uma apropriada decisão de manejo pode ser proposta, contanto que o fator limitante seja conhecido. Entretanto, insistem em que a produtividade deve ser monitorada durante diferentes anos e diferentes mapas de produtividade devem ser comparados antes de realizar alguma ação. Os autores acrescentam ainda que estes mapas são uma útil fonte de dados sobre a produtividade da cultura, mas mostram resultados de um único ano sob condições específicas de clima, de modo que mapas individuais não dão necessariamente informação suficiente para o que acontecerá em anos futuros.

Cook et al. (1999) em seu trabalho, reexaminaram o problema da tomada de decisão e sugeriram uma técnica empírica para manejo localizado, denominada "experimentação local" (*on-farm*). A técnica usa tecnologia de precisão para habilitar o produtor a desenvolver uma apreciação "caseira" do desempenho espacialmente variável da terra, a qual pode antes suplementar ao invés de substituir procedimentos de tomada de decisão. Os autores concluíram que a experimentação local é uma opção pragmática para produtores que desejam determinar a resposta localizada do solo a taxas variáveis de insumos. Usando aplicador a taxa variável para estabelecer o experimento e monitores de produtividade

para medir o resultado, é possível implementar experimentos em escala comercial sobre campos inteiros. Os resultados da "experimentação local", conforme Cook et al. (1999) fornecem dados detalhados a respeito da resposta obtida para um determinado ano, mas, sozinhos, fornecem pouca informação a respeito da variação. Contudo, ainda que concordando com Broos et al (1999) e Lütticken (1999), de que esta informação é de significado incerto para futuras decisões, os autores afirmaram que ela pode ser usada pragmaticamente pelos produtores para modificar o controle de insumos em safras subseqüentes.

Após identificar o nível de variação de atributos, considerando-se inclusive a variação temporal, o passo mais importante é encontrar as relações de causa e efeito entre os atributos do solo e os dados de produtividade. Isto significa, conforme Kuhar (1997), conhecer o que cada área é capaz de produzir e o meio de atingir seu potencial pleno. Sob este prisma, são concordantes Marques Júnior & Corá (1998), ao afirmar que um bem sucedido sistema de agricultura de precisão seria aquele em que os fatores limitantes para um ótimo retorno econômico e uma máxima proteção ao meio ambiente fossem identificados, caracterizados e manejados nos locais e tempo apropriados.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Descrição da área

A área estudada compreendeu um campo de produção de grãos, com 70 ha, sob o sistema de plantio direto, na Fazenda Morada do Sol, situada no município de Araguari/MG, cujas coordenadas de referência são 18º40' de latitude Sul e 48º15' de longitude Oeste. O relevo regional é medianamente dissecado em formas convexas, associadas a formas tabulares amplas, com drenagem pouco entalhada. Já o relevo local é plano, sendo a declividade média inferior a 1%. Apresenta vegetação original de cerrado. O tipo de solo predominante na propriedade, de acordo com EMBRAPA (1999), é o LATOSSOLO VERMELHO Distrófico textura argilosa, originado de coberturas Detrito-lateríticas terciárias e Quaternárias indiferenciadas (Brasil, 1983).

5.2 Material utilizado

5.2.1 Mapas de produtividade de milho e soja

Foram utilizados mapas de produtividade de 3 safras (1997/98, 1998/99 e 1999/2000), gerados pelo sistema AFS (Advanced Farming System), relativos à produção comercial da área de 70 ha.

No primeiro ano, safra 97/98, dispunha-se dos dados de produtividade de milho, semeados com espaçamento entre linhas de 0,90m (os híbridos plantados foram Cargill 702, Cargill 806 e Cargill 333). No segundo ano, safra 98/99, a produtividade monitorada foi a de soja (variedade MG/BR 22 – Conquista), sob o espaçamento de 0,45m entre linhas. O último mapa, da safra 99/00, apresentou novamente registros de produtividade de milho (híbrido Cargill 929), semeados no espaçamento entre linhas de 0,80m. Em todos os mapas, o intervalo de registro de dados foi de 3 segundos, o que resultou em uma média de 300 pontos por hectare.

5.2.2 Mapas de aplicação localizada de adubos

Na safra do primeiro ano, sob manejo convencional de adubação, foram aplicados 350 kg/ha do formulado 00-28-20 + 0,5 kg/ha de Zn, uniformemente distribuídos pela área pela ocasião do plantio, enquanto que a adubação de cobertura constou de uma aplicação de 133 kg/ha de nitrogênio. Para os dois anos seguintes, safras de 98/99 e 99/00, foram adotadas aplicações de adubo a taxa variável a partir de análises químicas efetuadas com uma amostragem em malha cuja densidade correspondeu a 1 amostra a cada 2 hectares, resultando nos mapas de aplicação localizada expostos nas Figuras 2 e 3.

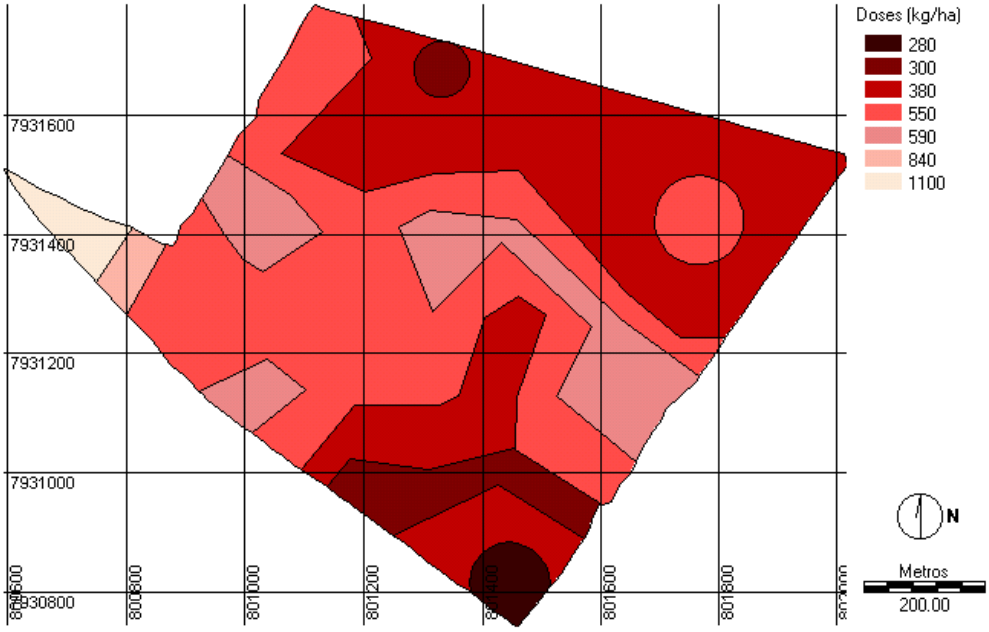


Figura 2. Mapa de aplicação em dose variável que orientou o manejo localizado da adubação para a safra 1998/99.

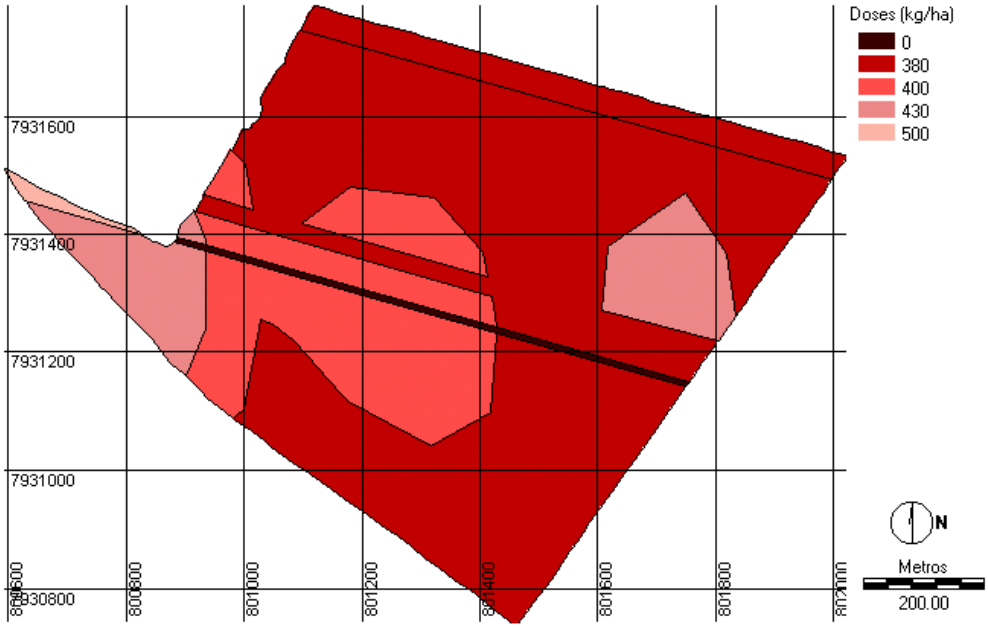


Figura 3. Mapa de aplicação em dose variável que orientou o manejo localizado da adubação para a safra 1999/00.

Estes mapas foram efetivamente elaborados e utilizados pelos prestadores de serviço responsáveis pela condução das culturas e pelo monitoramento das colheitas, servindo como elementos suplementares para a tentativa de interpretação das informações contidas nos mapas de produtividade, não sendo a sua adequação, portanto, objeto de averiguação.

5.2.3 Dados de precipitação pluviométrica

Na propriedade agrícola onde está situada a área de estudo são coletados diariamente os dados de precipitação pluviométrica, estando disponíveis os valores referentes ao período dos três anos agrícolas estudados, ou seja, de janeiro de 1997 a dezembro de 1999, cujas médias mensais e anuais estão compiladas no Quadro 1

Quadro 1. Totais mensais de precipitação pluviométrica para os anos de 1997, 1998 e 1999.

	Jan	**Fev**	**Mar**	**Abr**	**Mai**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Set**	**Out**	**Nov**	**Dez**	**Total anual**
1997	495	165	319	62	10	103	0	0	34	111	166	237	1702
1998	117	155	49	35	46	0	0	59	22	80	129	153	845
1999	341	72	323	75	0	0	0	0	45	23	150	202	1231

O nível médio de precipitação pluviométrica anual, para a região de Araguari-MG, é de 1350mm (Brasil, 1983).

5.2.4 Atributos químicos e físicos do solo

Foram utilizadas as análises químicas dos seguintes elementos: Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Alumínio (Al), além de atributos de solo como Matéria Orgânica (MO), Potencial Hidrogeniônico (pH), e Acidez Potencial (H+Al), Saturação por bases (V%), Soma de Bases (SB) e Capacidade de Troca Catiônica (CTC). Também foram utilizadas as análises físicas do solo (granulometria). Os dados das amostras foram oriundas de um levantamento em malha de 60m x 60m, incluindo a intercalação de alguns pontos a 30m em porções isoladas da área, que totalizaram 204 pontos amostrados (Figura 4). A área foi estaqueada e a amostragem foi realizada com o auxílio do mesmo receptor DGPS utilizado pelo sistema de monitoramento da colheita, com amostras retiradas na profundidade de 0 a 20cm.

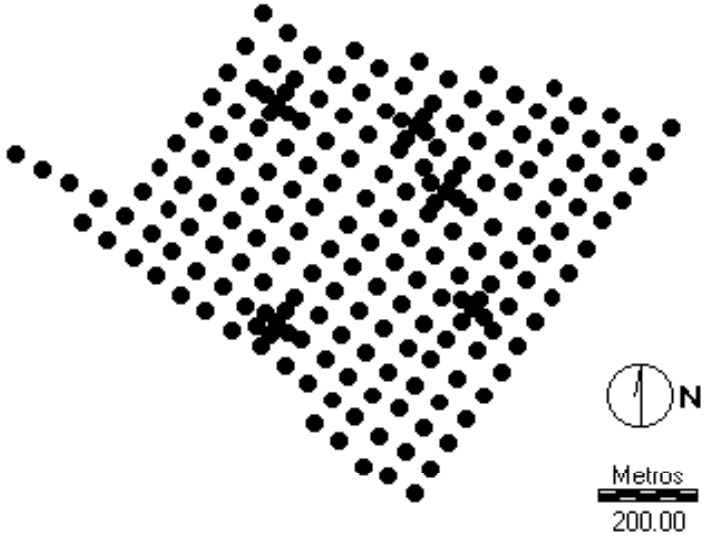


Figura 4. Esquema de amostragem de solo na área de estudo.

5.2.5 Informações complementares

Este estudo baseia-se amplamente em dados fornecidos por terceiros, cuja coleta efetuou-se anteriormente à adoção da área para o desenvolvimento dos trabalhos, e algumas informações, por várias razões, deixaram de ser registradas. O Quadro 2 apresenta

algumas informações complementares que foram consideradas no processo de interpretação dos dados de produtividade.

Quadro 2. Informações complementares relativas aos cultivos de milho/soja/milho nos respectivos anos na Fazenda Morada do Sol (Araguari/MG).

	Safra 97/98	**Safra 98/99**	**Safra 99/00**
Época de Plantio	17 a 20/10/97	15-12-98 10:00	18 a 26/11/99
Época de colheita	14-03-98 6:00	(não fornecida)	08-04-00 5:00
Inseticidas	Furadan, Ausistin, e Arevo	Lannate	Futor e Lannate
Herbicidas[a]	Primaiz (p.e.)	Trifluralina (p.p.i) e Classsic (p.e.)	Glifosato, Atrazina (p.e.) e Zetta (p.e.)
Pragas e doenças	lagarta do cartucho	(não fornecida)	lagarta elasmo e do cartucho
Média de produtividade[b]	6,560 t/ha	1,970 t/ha	6,592 t/ha

[a] p.e. = pós-emergente; p.p.i. = pré-plantio incorporado.

[b] Obtida pela pesagem dos caminhões e a divisão do peso total pela área colhida, durante o processo de colheita.

5.2.6 Equipamentos e programas para coleta e análise de dados

Para a realização do levantamento de solo, foi programado o uso de teodolito para definição do alinhamento, trado holandês para a retirada de amostras e um sistema de posicionamento (DGPS), que é parte integrante do sistema de monitoramento de colheita utilizado no mapeamento.

Para a formação do banco de dados, manipulação, classificação e análise dos dados, confecção e visualização dos mapas, utilizou-se o Sistema de Informação Geográfica IDRISI32 (Estman, 1999) e o programa de análise geoestatística GS+ (Gamma Design Softtware, 2000), bem como o uso de planilha eletrônica.

5.3 Método desenvolvido

5.3.1 Análise espacial

O primeiro passo deste estudo foi realizar uma análise espacial dos dados de produtividade com a finalidade de se averiguar a dependência espacial da variabilidade exibida em cada mapa. Os dados de produtividade de cada colheita foram objetos de uma análise exploratória preliminar, que visou identificar as eventuais distorções de

valores ou erros de posicionamento que pudessem estar presentes no conjunto de dados, de modo a permitir a adoção de alguma medida de correção que pudesse ser aplicada para tentar eliminar ou ao menos amenizar a influência que estes desvios pudessem exercer.

Num primeiro momento, os valores foram analisados quanto à normalidade de sua distribuição, através da realização de um teste de normalidade, juntamente com uma análise dos valores de assimetria e curtose. Foi verificada a presença de valores discrepantes e suas respectivas localizações. Um dado de produtividade pode ser discrepante tanto em termos de posição quanto em termos de magnitude do valor registrado. Foi definido que um dado de produtividade poderia ser discrepante quanto à posição por estar representado fora da área colhida ou por estar localizado numa posição que não caracteriza um ponto de registro de produtividade, mas que reflita sim uma mudança de linha ou a movimentação do equipamento dissociada da alimentação da plataforma, internamente à área de colheita, bem como registros de final de linha e de bordadura da área. No caso da bordadura, se a colheita fosse efetuada com a máquina deslocando-se no sentido transversal às linhas de plantio, a plataforma dificilmente seria alimentada com uma quantidade de material semelhante à quantidade que seria recolhida se a operação fosse realizada no mesmo sentido das linhas de plantio, especialmente para o milho, cujo espaçamento entre plantas e entre linhas, em relação à soja, é maior. Em termos de magnitude do valor de produtividade registrado, foi definido que um dado de produtividade poderia ser considerado discrepante quando, pelo critério de definição de "*outliers*", fossem encontrados valores que se enquadrassem nesta categoria. A verificação de "*outliers*" foi efetuada pelo critério dos limites superior e inferior de uma distribuição normal, conforme Libardi et al. (1996) e Gonçalves et al. (1999), obtidos pelas equações :

$$ls = qs + (1{,}5 * ai) \quad (3)$$

$$li = qi - (1{,}5 * ai) \quad (4)$$

onde,

ls = limite superior;

li = limite inferior;

qs = quartil superior;

qi = quartil inferior; e,

ai = amplitude interquartil.

Não sendo possível a utilização deste critério, o processo de expurgo de valores discrepantes poderia ser conduzido pela análise de percentis, adotando-se um determinado valor de percentil que permitisse a exclusão dos referidos valores. Outro critério considerado para a remoção de valores irreais previu a adoção de valores mínimos e máximos, considerando o valor da média de cada ano subtraída de um determinado número de desvios padrões, após a exclusão prévia de valores nulos. De modo mais pragmático, a definição e eliminação de valores discrepantes poderia ser baseada na média de produtividade obtida e informada pelo produtor em cada safra, de modo que a retirada de valores com níveis irreais de produtividade permitisse o ajuste dos dados para uma média calculada semelhante à média informada. Neste sentido, não seria necessário um teste de comparação de médias para atestar a semelhança entre elas, mas uma diferença absoluta, que pudesse ser minimizada com a saída de valores discrepantes. Buscou-se a definição dos limites superior e inferior, a partir dos quais os valores do conjunto de dados poderiam ser filtrados diretamente na planilha eletrônica. Na ausência de um critério definitivo que fundamentasse a filtragem de dados discrepantes em termos de magnitude do valor registrado, foi estabelecido que seria efetuado apenas o descarte dos valores nulos em todos os anos.

A análise da estrutura e dependência espacial propriamente dita consistiu da construção dos semivariogramas experimentais para cada conjunto de dados de produtividade e de propriedades do solo (Isaaks & Srivastava, 1989), utilizando-se o programa GS+. O nível de variação espacial foi quantificado pela porcentagem da semivariância estrutural (%C), sugerida por Gamma Design Software (2000), que é a razão entre a semivariância estrutural (C) e o patamar da semivariância (Co + C). O patamar representa o nível da semivariância que aproxima-se da variância amostral, no momento de estabilização da curva, cuja distância entre pares indica o fim da dependência entre os respectivos valores. Este índice considera a mensuração da dependência espacial pelo confronto do nível da semivariância estrutural (compreendida entre o nível de efeito pepita e o patamar) em relação à semivariância total, dando um enfoque inverso ao índice IDE (índice de dependência espacial) defendido anteriormente por Trangmar (1985), pelo qual a mensuração da dependência espacial é dada pela razão entre o efeito pepita (Co) e a semivariância total, representada pelo valor do patamar. Embora a referência seja invertida, em termos quantitativos, os dois apresentam resultados iguais. A sugestão é de que o critério para

classificação por este coeficiente seria: alta variabilidade, quando o %C for maior que 75%; média variabilidade para 75% > %C > 25%; e baixa variabilidade para %C abaixo de 25%.

A modelagem dos semivariogramas experimentais dos valores de produtividade indicou, na presença de dependência espacial entre os dados, a possibilidade de utilização da krigagem para a interpolação dos mapas de produtividade e de fertilidade do solo.

Para a análise da correlação ou dependência espacial entre os valores de produtividade de diferentes anos, fazendo-se uso do semivariograma cruzado, conforme descrito por Goovaerts (1998), necessitou-se obter alguns pontos com equivalência de coordenadas geográficas para os três mapas, conforme ilustrado nas Figuras 5 e 6. Efetuou-se, inicialmente, uma transformação de formato dos arquivos de produtividade, convertendo-se os arquivos vetoriais de pontos para arquivos matriciais, com células suficientes para registrar a presença de todos os pontos existentes.

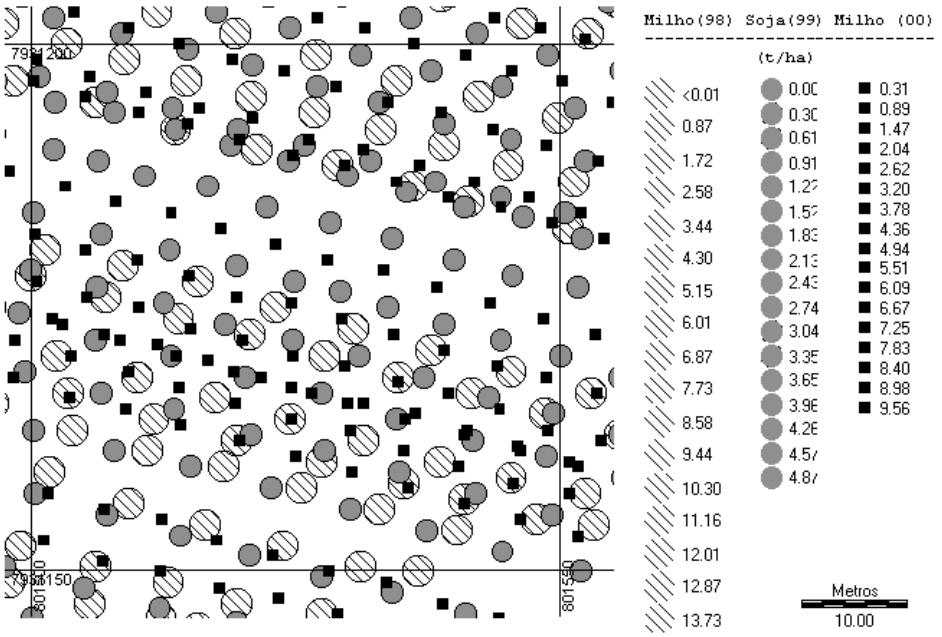


Figura 5. Exemplo de divergência total de posicionamento dos valores de produtividade para os três anos, oriundos dos mapas vetoriais.

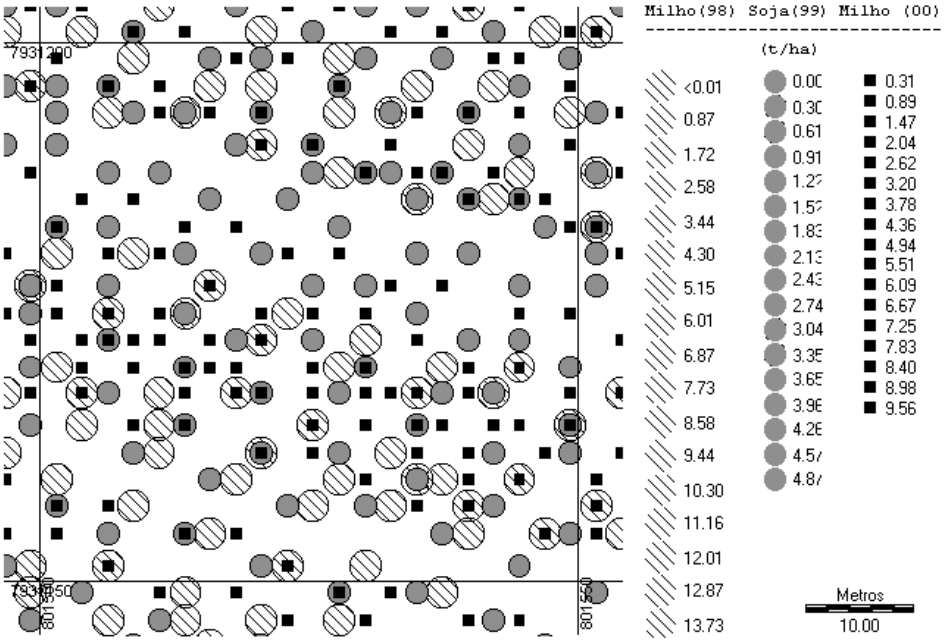


Figura 6. Exemplo de divergência/convergência de posicionamento dos valores de produtividade para os três anos, oriundos dos mapas rasterizados.

Este procedimento padronizou a posição dos registros de produtividade para as coordenadas centrais das células que os continham. O cruzamento dos arquivos matriciais foi efetuado para identificar os pontos com equivalência de coordenadas em pelo menos dois arquivos. A seguir, efetuou-se uma nova mudança de formato, transformando os arquivos matriciais em arquivos vetoriais que continham os pontos coincidentes, os quais serviram de base para o cálculo dos semivariogramas cruzados.

5.3.2 Interpolação dos dados de produtividade de milho e soja e de atributos do solo

A estimativa de valores de produtividade e de atributos químicos e físicos do solo para a geração, no SIG IDRISI, de uma superfície contínua destes atributos foi efetuada através da utilização das técnicas da krigagem, que segundo vários autores (Creutin & Obled, 1982; Tabios & Salas, 1985; Laslet et al., 1987; Warrick et al., 1988; Voltz & Webster, 1990; Burrough et al., 1992; Irvin et al., 1997 e Zimback et al., 1998), apresenta superioridade de estimativa para representação de fenômenos ambientais e de solo. A krigagem foi utilizada nos casos em que foi possível detectar e modelar a estrutura da variabilidade espacial. Na ausência de dependência espacial, ou na presença de estrutura de

variação espacial cuja modelagem não mostrou-se exeqüível para o nível de amostragem realizada, um outro estimador linear foi adotado para a confecção do respectivo mapa.

5.3.3 Classificação dos mapas de produtividade de milho e soja

Os mapas de produtividade foram submetidos a um processo de classificação através da técnica de análise de agrupamentos (*multivariate clustering*), para identificar as áreas (sub-regiões) com padrão de variação identificável para os valores de produtividade entre anos agrícolas subseqüentes. Em virtude de se trabalhar com culturas que apresentam níveis de produtividade totalmente diferentes (milho e soja), inicialmente, os mapas interpolados foram padronizados, fazendo-se uso da distribuição da variável padronizada "z" (com média zero e desvio padrão unitário), partindo-se da interpolação dos valores normais (t/ha), pela técnica da krigagem ordinária, conforme procedimento descrito a seguir:

- A região interpolada foi delimitada pelo cruzamento com a imagem contendo o perímetro da área colhida;
- A padronização dos valores interpolados foi conduzida no módulo *Image Calculator* do IDRISI, baseada na equação:

$$z = (x - \mu)/s \qquad (5)$$

onde:

z = valor padronizado da produtividade para a respectiva safra;

x = valor original (representado por cada uma das células da imagem interpolada);

μ = média da produtividade calculada para o conjunto de dados que originou a superfície; e,

s = desvio padrão calculado para o conjunto de dados que originou a superfície.

Como o procedimento foi aplicado a toda a imagem, os valores de fundo (que possuem valor zero) foram também padronizados, embora não tenham contribuído para o cálculo da média e do desvio padrão. Por essa razão, fez-se necessário uma nova exclusão de valores externos à área colhida, através do cruzamento com a imagem contendo o referido perímetro.

Essa padronização dos dados poderia ser efetuada diretamente sobre os valores pontuais na planilha eletrônica, antes de interpolar. Entretanto, embora a estrutura da variabilidade seja detectada da mesma maneira para os dados transformados, a técnica de interpolação por krigagem ordinária não apresentaria os resultados esperados, uma vez que seria necessária uma interpolação específica para dados padronizados, os quais incluem valores negativos em sua distribuição, semelhante ao que ocorre com dados que exibem uma distribuição logarítmica.

5.3.3.1 Análise de agrupamentos dos dados de produtividade de milho e soja

Um conjunto de dados multivariado, como os representados pelos mapas de produtividade de três safras, pode ser comparado a um grupo de bandas espectrais de uma imagem de satélite, os quais permitem a adoção de técnicas de análise de agrupamento para realizar a classificação das feições observadas em uma imagem composta pelas respectivas bandas. Na imagem de satélite, cada célula registra a reflectância relativa ao tipo de cobertura presente na superfície abrangida pela sua resolução espacial. No mapa de produtividade, cada célula registrou o nível de produtividade estimado pelo processo de interpolação. Assim, foi aplicado aos dados de produtividade o procedimento descrito a seguir:

- Através do SIG IDRISI, foi criada uma imagem composta dos 3 anos pelo módulo COMPOSITE. Para que este módulo execute a composição da imagem, a lógica do procedimento computacional exige que as imagens dos dados de produtividade sejam convertidas para dados do tipo *byte* em 256 níveis discretos. Para isto, foi usado o módulo STRETCH.
- A imagem composta foi classificada de acordo com o método de classificação não supervisionada implementado no módulo CLUSTER, que é uma variante especial de uma técnica de análise de agrupamento de Picos de Histograma (Richards, 1993, citado por Eastman, 1999). O procedimento pode ser mais bem entendido pela perspectiva de uma única imagem, quando o histograma de valores de reflectância ou, no caso, dos níveis de produtividade mostraria um número de picos e de vales. Os picos representam, conforme Eastman (1999), grupos de valores mais freqüentes associados com algum tipo de cobertura do solo, sendo que no caso da produtividade,

estaria associado com algum padrão de comportamento. A classificação poderia ser, opcionalmente, mais ampla, quando não incluiria a definição de um número muito pormenorizado de classes, ou refinada, quando uma segregação mais acentuada seria efetuada. Havia ainda a possibilidade de limitar o número máximo de grupos que seriam formados. Quando o procedimento foi aplicado sem restrições, o algoritmo efetuou a separação de todos os grupos identificáveis, desde grupos com maior freqüência até aqueles cuja freqüência chegou a ser insignificante. Para concentrar em um número de agrupamentos que permitisse analisar uma possível associação com algumas categorias de comportamento da produtividade, tais como produtividade acima ou abaixo da média, produtividade ascendente ou descendente, foi limitado em 3 ou 4 o número máximo de agrupamentos nos quais os valores seriam classificados.

5.3.3.2 Determinação de classes de comportamento da produtividade de milho e soja

Para a classificação da produtividade, de acordo com o seu comportamento durante as três safras, foram usados os mapas padronizados pela variável *z*, conforme apresentado pela equação (5).

Pela tabela de distribuição de probabilidade da variável padronizada "z", 33% dos valores ficam abaixo de –0,44; 34% estão compreendidos entre –0,44 e +0,44; os 33% restantes ficam acima de +0,44. Desta forma, partindo-se dos valores de produtividade padronizados pela variável "z", pôde-se dividir o conjunto em 3 porções, os quais corresponderam a valores abaixo da média ($z < -0,44$), em torno da média ($-0,44 \leq z \leq +0,44$) e acima da média ($z > +0,44$). Com estes intervalos, reclassificou-se cada mapa de produtividade. A partir daí foi possível efetuar um cruzamento destes mapas primariamente classificados por este critério, de modo a obter um conjunto de associações entre os três anos que indicaria os diferentes comportamentos da produtividade em cada local da área. Preliminarmente, foi obtido um mapa de comportamento da produtividade cujas áreas indicaram qual o nível de produtividade obtido para aquele local no decorrer do período. Num determinado local, a produtividade pode ter sido, por exemplo, abaixo da média no primeiro ano, abaixo da média no segundo ano e em torno da média no terceiro ano. Essa sobreposição resultaria 27 possíveis combinações. Esse nível de fragmentação implicou em maior

dificuldade de efetuar uma possível associação destas combinações com algum agrupamento classificado previamente. Dessa forma, foi preciso adotar um critério de união dessas combinações, de modo a definir 3 ou 4 classes de comportamento mais abrangentes, que poderia resultar num mapa menos restritivo para comparações posteriores. Assim, definiu-se que as combinações seriam agrupadas em torno de 3 ou 4 comportamentos distintos, como por exemplo, produtividade ascendente, descendente, oscilante ou estagnada.

5.3.4 Obtenção de dados de precipitação pluviométrica e atributos de solo

O registro de dados de precipitação pluviométrica diária constituiu-se uma rotina na propriedade onde se encontra a área de estudo, estando disponíveis os valores relativos ao período em que foram cultivadas as três safras cuja produtividade foi mapeada, ou seja, de janeiro de 1997 a dezembro de 1999.

A área foi alvo de uma amostragem adensada de solos, em uma malha de pontos distanciados de 60m entre si, e com algumas aglomerações de pontos distanciados de 30m, realizada em setembro de 2000. As amostras foram encaminhadas respectivamente, aos laboratórios de química e física de solo, do Departamento de Recursos Naturais da Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP/Botucatu, para análise química dos seguintes elementos: Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Alumínio (Al). Alguns atributos de solo como Matéria Orgânica (MO), Potencial Hidrogeniônico (pH), e Acidez Potencial (H+Al) também foram determinados, e os atributos derivados desses resultados (Saturação por bases (V%), Soma de Bases (SB) E Capacidade de Troca Catiônica (CTC)) foram calculados e fornecidos. P, Ca, Mg e K foram extraídos com resina trocadora de íons. O Fósforo foi determinado por colorimetria; Cálcio, Magnésio e Potássio foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica. A acidez potencial (H+Al) foi determinada através da Solução Tampão SMP. O pH foi determinado em solução de CaCl2 0,01M, e a Matéria Orgânica pelo método do colorímetro. As análises químicas seguiram a metodologia descrita por Raij & Quaggio (1983). Foram determinados também a granulometria das amostras de solo pelo método do densímetro, conforme descrito por EMBRAPA (1997).

As seguintes propriedades do solo foram mapeadas a partir das análises das 204 amostras retiradas na profundidade de 0 a 20cm: pH, V%, CTC, M.O., P, K, Ca, Mg, Al, argila, silte e areia total. As distâncias foram definidas numa tentativa de abranger

uma escala de amostragem capaz de identificar, se possível, toda a variação espacialmente dependente entre os atributos. Os dados foram submetidos à análise espacial através das técnicas de geoestatística no GS+, sendo executada a interpolação desses dados para o mapeamento dos atributos de solo, lançando-se mão da krigagem, quando confirmada a dependência dos valores medidos, utilizando-se o SIG IDRISI32 (Eastman, 1999).

5.3.5 Análise da relação da variabilidade de atributos do solo e mapas de produtividade de milho e soja

Mediante a possibilidade de relacionar uma classe de comportamento a uma sub-região delimitada pela análise de agrupamento, e com o intuito de identificar possíveis causas da variação na produtividade, os dados de produtividade de cada sub-região foram cruzados com informações de mapas obtidos através da interpolação dos valores de atributos de solo levantados, buscando-se alguma indicação de correlação entre os níveis dos diferentes nutrientes ou de granulometria e a produtividade e as implicações da textura do solo para condições diferentes de precipitação pluviométrica. Para isso, foram efetuadas as sobreposições dos mapas contendo os agrupamentos e os mapas de atributos de solos, através do módulo CROSSTAB do SIG IDRISI32.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

6.1 Análise estatística descritiva e tratamento dos dados

O Quadro 3 apresenta os resultados da análise estatística descritiva realizada para os dados de produtividade e de atributos do solo.

Quadro 3. Resultados da análise estatística descritiva para os dados de produtividade e de atributos do solo.

	Estatísticas							
Atributos	**Média (a)**	**Mediana (a)**	**Moda (a)**	**Mínimo (a)**	**Máximo (a)**	**Desvio pad. (a)**	**Erro pad. (a)**	**CV(%)(b)**
Milho (1998)	7,269	7,17	3,18	0,01	13,73	3,224	0,023	44
Soja (1999)	2,344	2,49	2,93	0,01	4,87	0,978	0,007	42
Milho (2000)	6,237	6,52	6,94	0,31	9,56	1,179	0,007	19
Areia	14,035	14	13	11	18	1,626	0,116	12
Argila	65,46	65	71	47	80	6,372	0,446	10
Silte	20,30	21	17	8	31	5,191	0,363	26
pH	4,588	4,6	4,6	3,7	5,9	0,377	0,026	8
M.O.	24,30	24	24	16	31	2,285	0,162	9
P	33,51	24	19	5	243	29,96	2,097	89
Ln(P)	3,257	3,178	2,944	1,609	5,493	0,679	0,047	21
K	1,592	1,4	1,3	0,1	3,8	0,788	0,057	49
Ca	17,96	16	14	5	36	6,273	0,443	35
Mg	5,26	5	4	1	11	2,032	0,145	39
SB	25,27	23	23	8	50	8,811	0,619	35
CTC	63,03	64	65	43	80	7,845	0,562	12
V%	41,05	40	37	12	74	13,2	0,924	32

(a) = t/ha. **(b)** C.V. = (desvio padrão/média) x 100

Os mapas de produtividade gerados pelo sistema AFS, com registros de dados efetuados a cada 3 segundos, originalmente eram compostos de arquivos contendo acima de 20.000 pontos para uma área colhida de aproximadamente 70 ha. Ao serem

importados para o SIG-IDRISI, os mapas gerados provocavam a falsa impressão de que os dados ocupavam a totalidade da área, quando na verdade os pontos distanciavam-se em média 7 metros entre si (Figuras 7, 8, 9 e 10).

Todos os conjuntos de dados englobaram muitos valores de produtividade nula ou até abaixo do que poderia ser obtido em condições de produção totalmente desfavoráveis, indicando a presença de valores enganosos. Segundo Molin (2000), é sempre necessário um tratamento preliminar dos dados antes de transformá-los em um mapa passível de análise e tomada de decisão e que, embora tais erros sejam intrínsecos ao processo de geração dos dados e às limitações dos sistemas, não devem ser motivo para descrédito.

A normalidade da distribuição dos dados de produção e de atributos do solo foi verificada através dos valores dos coeficientes de assimetria e curtose, cujos resultados são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4. Resultados do coeficientes de assimetria e curtose obtidos para todos os atributos estudados.

Atributo	Assimetria	Curtose
Milho (1998)	0,014	-0,995
Soja (1999)	-0,428	-0,811
Milho (2000)	-1,146	1,304
Areia	0,157	-0,552
Argila	-0,111	-0,521
Silte	0,048	-0,325
Acidez (pH)	0,433	0,078
M. O.	-0,161	-0,502
P	3,147	14,098
ln (P)	0,445	0,395
K	0,808	0,236
Ca	0,512	-0,363
Mg	0,674	-0,003
SB	0,523	-0,345
CTC	-0,628	0,046
V%	0,263	-0,627

Os coeficientes de assimetria e curtose obtidos para os valores de Fósforo, nitidamente superiores aos exibidos por uma distribuição normal, revelaram uma distribuição lognormal, confirmada com a transformação destes dados para ln (P). Pela análise

dos coeficientes de assimetria e curtose dos demais atributos , a distribuição desses dados pôde ser considerada normal, pois, segundo Libardi et al. (1996), os valores dos coeficientes de simetria e curtose próximos a zero sugerem uma distribuição normal para os dados (Quadro4).

A distribuição de freqüência dos dados de produtividade das três safras confirmou também, através da análise gráfica de seus histogramas, uma proximidade com a distribuição normal, ainda que com uma assimetria mais acentuada para a última safra. Os histogramas dos atributos químicos e físicos do solo sugeriram também uma distribuição normal, com exceção do Fósforo. Com a transformação dos valores para o logaritmo natural, a distribuição dos valores transformados de Fósforo (ln[P]) aproximou-se, então, de uma distribuição normal. Nas Figuras 11 e 12 estão ilustrados todos os histogramas citados.

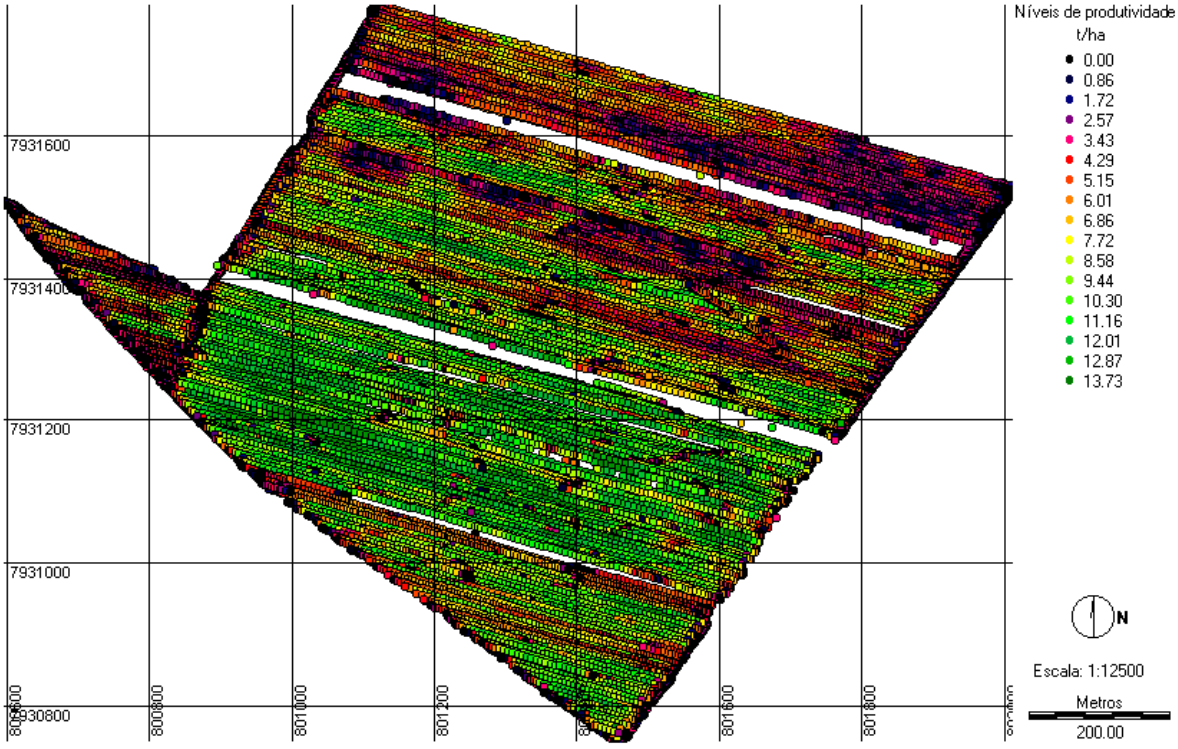


Figura 7. Mapa original de produtividade de milho (1998) .

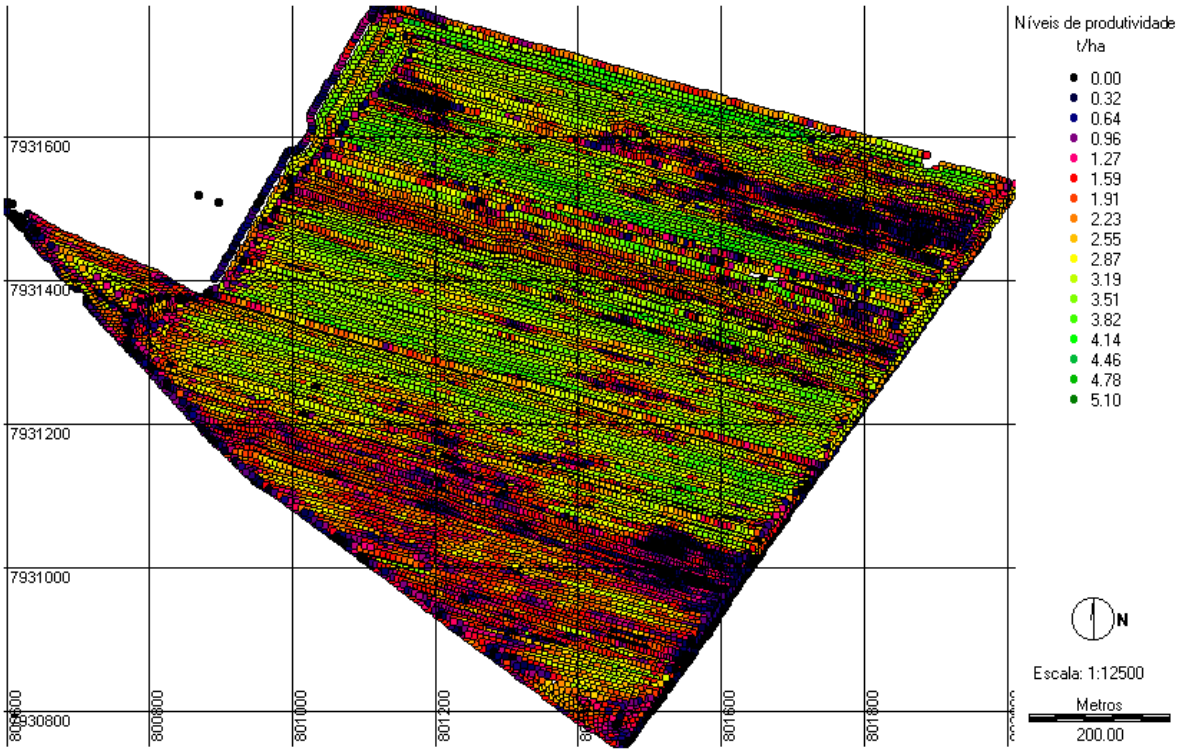


Figura 8. Mapa original de produtividade de soja (1999) .

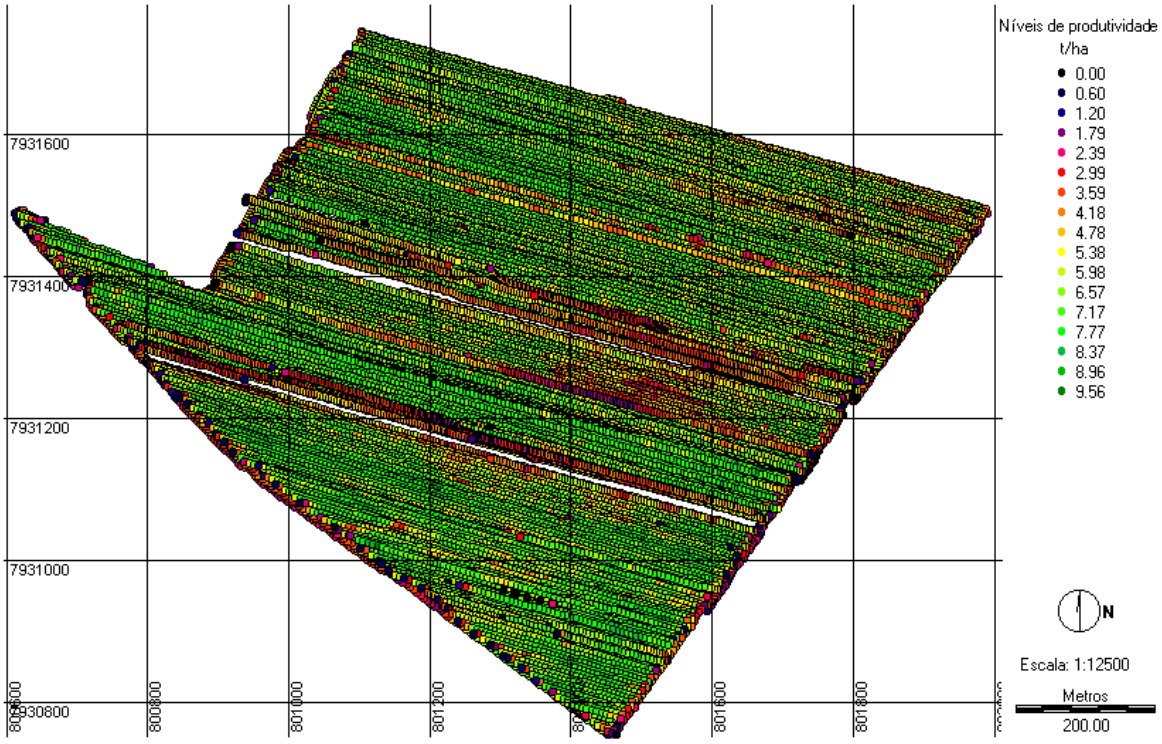


Figura 9. Mapa original de produtividade de milho (2000) .

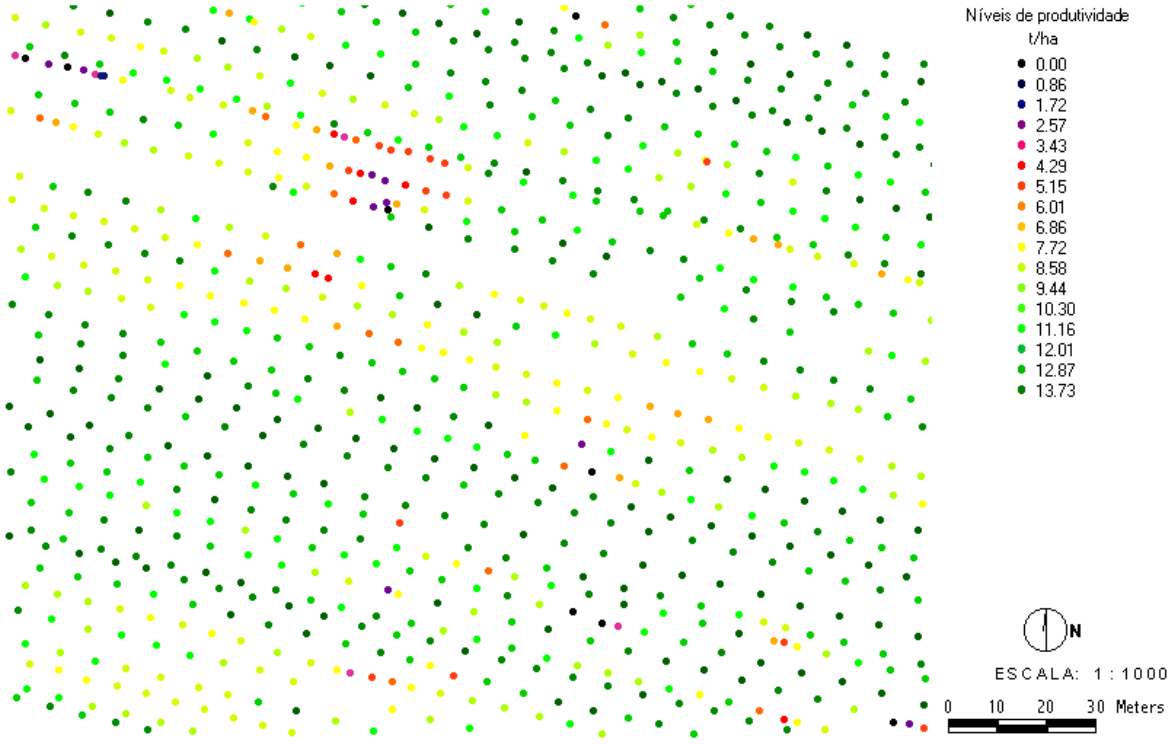


Figura 10. Detalhe do mapa original de produtividade de milho (1998), revelando o espaçamento entre as fileiras de pontos.

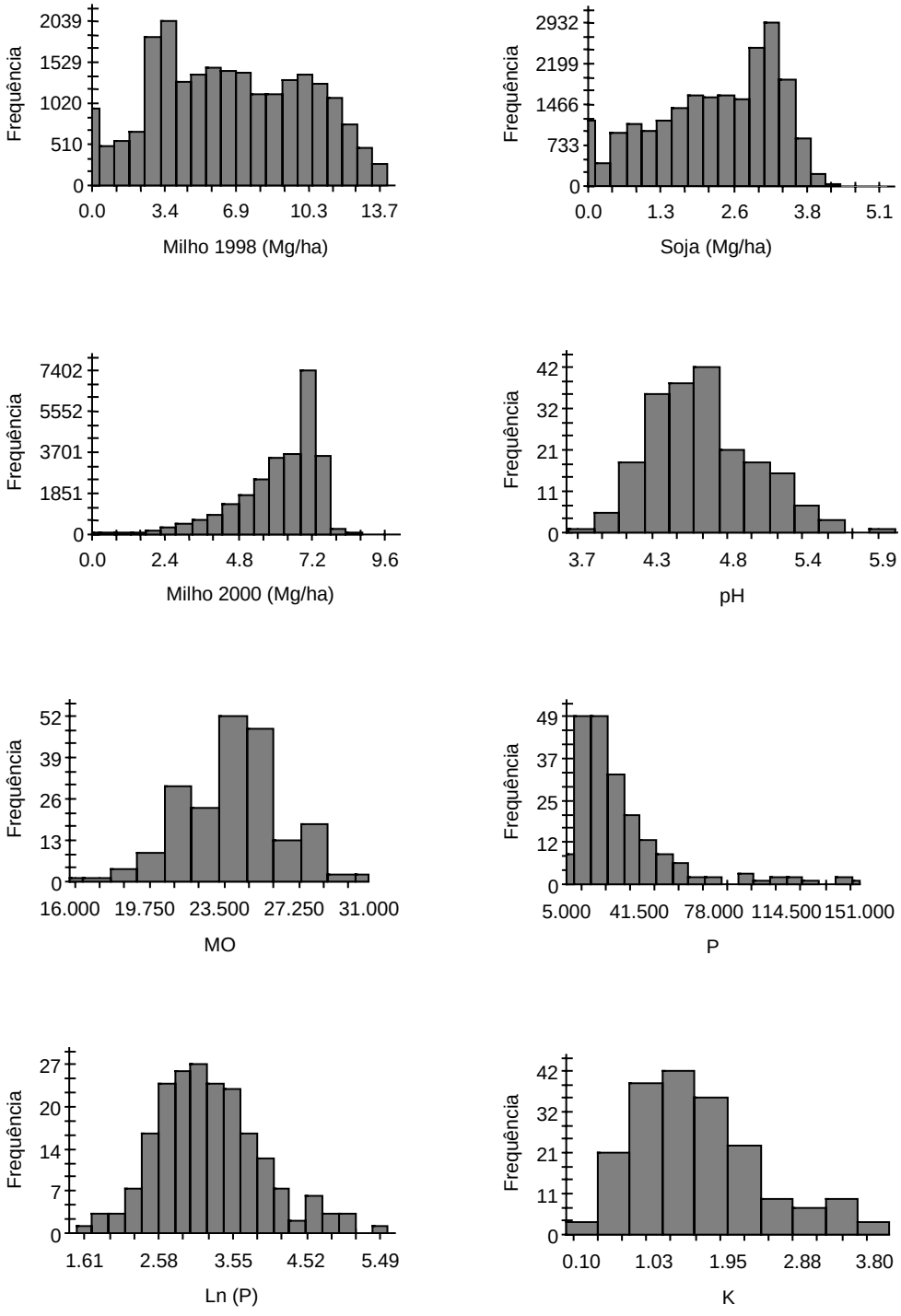


Figura 11. Histogramas dos dados de produtividade de Milho em 1998, Soja em 1999, Milho em 2000, Acidez do solo (pH), Matéria Orgânica (MO), Valores originais de Fósforo (P), Valores transformados de Fósforo [ln (P)] e Potássio (K).

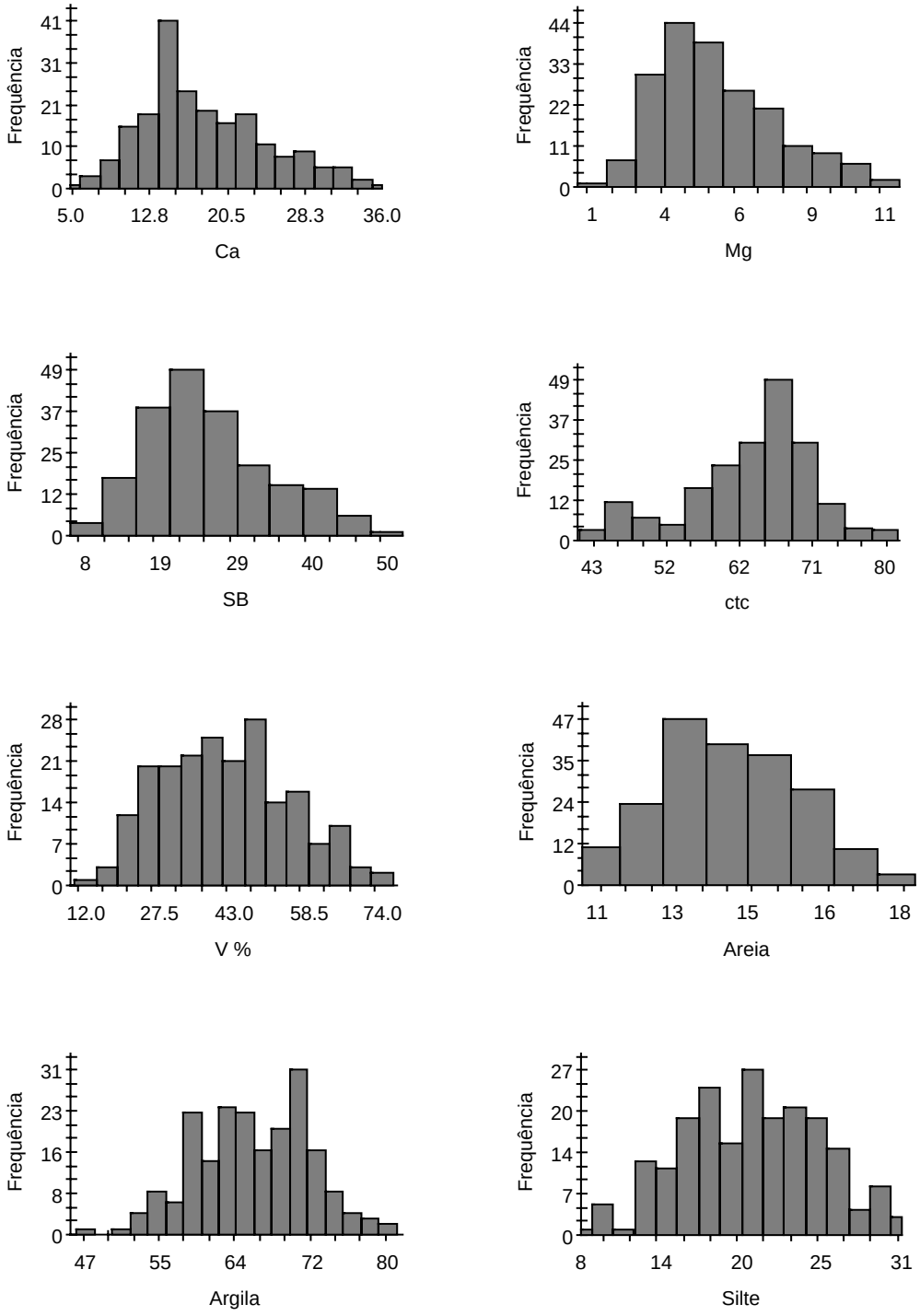


Figura 12. Histogramas dos dados de Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Soma de Bases (SB), Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Saturação por Bases (V%), Areia, Argila e Silte.

Em relação aos dados de produtividade, embora fosse notória a irrealidade de muitos valores presentes nos conjuntos de dados originais (produtividade abaixo de 1 t/ha, ou acima de 12 t/ha, quando a média girou em torno de 6 t/ha), nenhum valor extremo, em todos os conjuntos de dados, foi classificado como *outlier*, o que impossibilitou a eliminação desses valores por esse critério, antes de proceder às análises geoestatísticas.

A alternativa de ajustar a média dos dados originais com a eliminação de parte dos valores extremos da distribuição em cada conjunto, de modo que as médias calculadas a partir dos dados se aproximassem das médias obtidas e informadas pelo responsável pela colheita não se mostrou adequada. Não foi possível usar este recurso para todos os conjuntos de dados pelo fato de que o diferencial entre as médias foi muito reduzido, de modo que não permitia a eliminação de muitos pontos de produtividade insignificante ou exorbitantes para ajustar as médias a um valor similar (Quadro 5).

Quadro 5. Médias e coeficientes de variação dos valores de produtividade registrada pelo monitoramento eletrônico da colheita e pela pesagem dos caminhões:

Ano da colheita	Cultura	Média dos dados[(a)]	CV(%)	Média informada
1998	Milho	6,578	54	6,560
1999	Soja	2,203	49	1,970
2000	Milho	6,092	23	6,592

(a) = (em t/ha, incluindo valores nulos).

Quando foi avaliada a possibilidade de remoção de valores irreais, considerando o valor da média de cada ano subtraída de um determinado número de desvios padrões, após a exclusão prévia de valores nulos, também não foi possível adotar este critério na definição de valores mínimos e máximos para remoção de valores discrepantes para todos os mapas, porque cada ano apresentou uma variância distinta. A primeira safra de milho exibiu um coeficiente de variação 2,3 vezes maior que a segunda, calculados a partir dos valores originais, embora as médias tenham sido bem próximas (Quadro 5).

De modo semelhante ao que foi relatado por Shatar & McBratney (1999), que descartou valores de produtividade de um conjunto de dados de uma colheita de sorgo relativos aos percentis 0,5 superior e 2,5 inferior, buscou-se adotar um valor de percentil, tanto inferior quanto superior, que pudesse ser utilizado como referência para a citada remoção de valores discrepantes. Por não se tratar de um conjunto único de dados,

também esta análise exploratória não revelou um critério adequado para o procedimento que se pretendia adotar, uma vez que a presença maciça de valores nulos no primeiro ano e a incidência relativamente menor nos anos posteriores exibiu valores muito distantes de produtividade para um determinado percentil inferior. O Quadro 6 exibe um resumo da análise de percentis, no qual se observa que a decisão de descartar os valores do percentil 4,5 representaria desconsiderar produtividades de 0,41 t/ha de milho em 1998, 0,02 t/ha de soja em 1999 e 3,18 t/ha de milho em 2000.

Quadro 6. Resumo da análise de percentis efetuada para os valores originais de produtividade das três safras estudadas.

***Milho 1998*[(a)]**	***Percentil***	***Soja*[(a)]**	***Percentil***	***Milho 2000*[(a)]**	***Percentil***
0.57	5.00%	0.06	5.00%	3.3	5.00%
0.41	**4.50%**	**0.02**	**4.50%**	**3.18**	**4.50%**
0.22	4.00%	0	0.00%	3.05	4.00%
0.03	3.50%			2.88	3.50%
0.01	3.30%			2.69	3.00%
0	0.00%			2.5	2.50%
				2.26	2.00%
				1.95	1.50%
				1.48	1.00%
				0.9	0.50%
				0.02	0.10%
				0	0.00%

(a) valores de produtividade em t/ha

Desta forma, por não ter sido possível a adoção de um critério definitivo que fundamentasse a filtragem de dados discrepantes em termos de magnitude do valor registrado, foram descartados apenas os valores nulos em todos os anos.

Por outro lado, analisando a discrepância dos dados em termos de localização, a verificação de valores baixos nas bordaduras indicou também a condição de registros inconsistentes de produtividade (Figura 13), provavelmente devido ao deslocamento da máquina ter ocorrido no sentido transversal às linhas de plantio, impedindo que a plataforma fosse alimentada com uma quantidade regular de material obtida para a operação realizada no mesmo sentido das linhas de plantio. Alie-se a isto, o fato das linhas de plantio na bordadura, muitas vezes, apresentarem irregularidades que também contribuiriam para impedir o completo preenchimento da largura de corte. Molin (2000) atesta que este tipo de erro é caracterizado por faixas com baixa produtividade ao longo do talhão. O autor ressaltou

ainda a presença de registros distorcidos devido ao tempo de enchimento da colhedora, antes do ritmo normal do fluxo ser atingido.

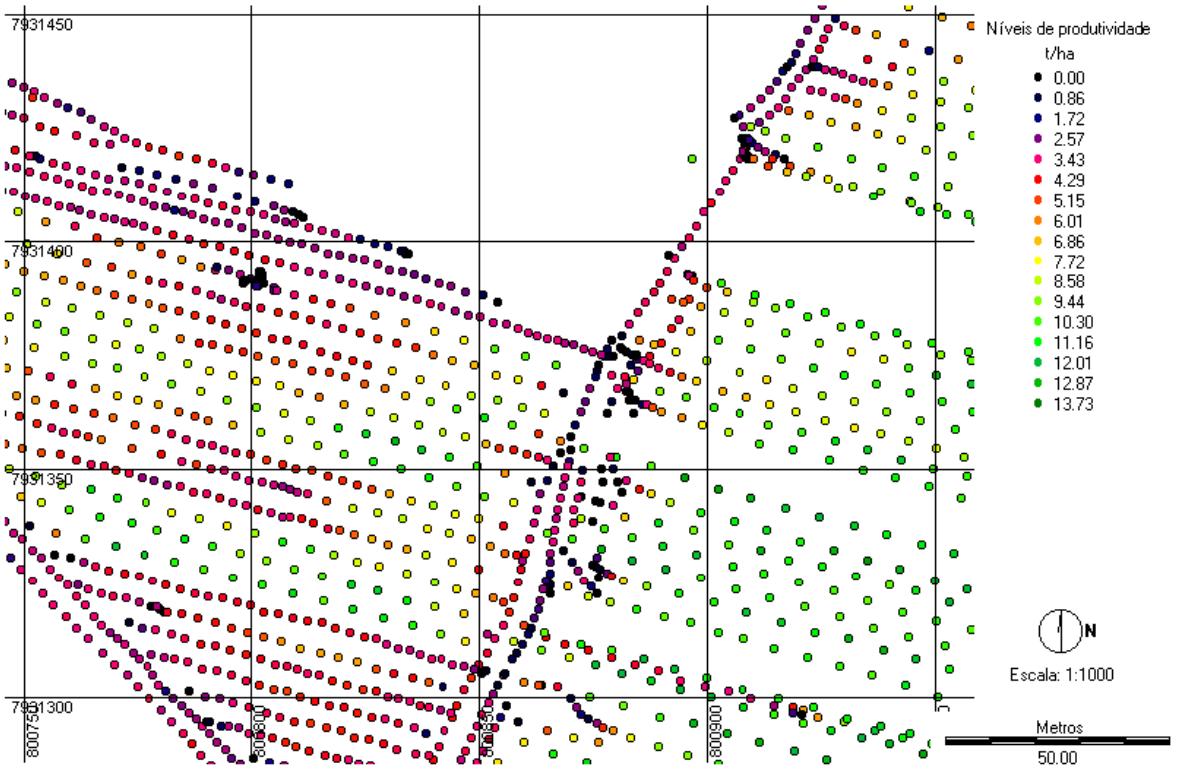


Figura 13. Exemplo de registros de produtividade inconsistentes, identificados pela colheita efetuada no sentido transversal às linhas de plantio.

Simmelsgaard & Djurhuus (1997) excluíram, de modo semelhante, registros de produtividade durante a partida da máquina, próximo à bordadura ou quando o material restante não preencheria completamente a plataforma.

Também puderam ser eliminados muitos pontos que registraram baixas produtividades ao final da linha de deslocamento da máquina, junto à bordadura, ou nos locais em que ficava evidente a redução progressiva dos valores de produtividade. Os "artefatos" da colheita que foram igualmente descartados por Shatar & McBratney (1999), devem ser situações semelhantes a estas, que ocorrem devido à mudança de faixa ou parada para descarga do depósito graneleiro da colhedora, em função da ausência de alimentação sem a interrupção do registro pelo sensor de fluxo de massa de armazenamento, quando os dados registrados referem-se mais ao material de realimentação da trilha e não representam fielmente a produtividade naqueles pontos. Para Molin (2000), a ausência de um correto ajuste do

interruptor da plataforma (que controla o registro dos dados de acordo com a posição da plataforma) também é uma fonte de erros, principalmente em manobras de cabeceira. Blackmore (2000) cita o uso de um filtro especial utilizado para a identificação e remoção da maior parte dos dados errôneos de acordo com um conjunto de regras especiais, sem no entanto indicar quais foram os erros e as respectivas regras para a remoção. A Figura 14 ilustra alguns destes “artefatos” encontrados nos mapas estudados, identificados como possíveis deslocamentos para descarga do depósito graneleiro. Esse procedimento de remoção de dados errôneos teve sua aplicação mais restrita em ralação aos dados de produtividade de soja, pois não foi possível identificar com segurança muitos locais em que os registros poderiam ter seus baixos valores de produtividade associados à interrupção da alimentação da plataforma no decorrer do percurso ou à mobilização da máquina sem a entrada de material. Mesmo em relação às faixas colhidas no sentido transversal às linhas de plantio, elas não revelaram clara inconsistência nos valores registrados em alguns trechos da bordadura, provavelmente em função dos menores espaçamentos da cultura permitirem um preenchimento normal da plataforma, atingindo uma entrada de material bem distribuída na largura de corte predefinida (Figura 15).

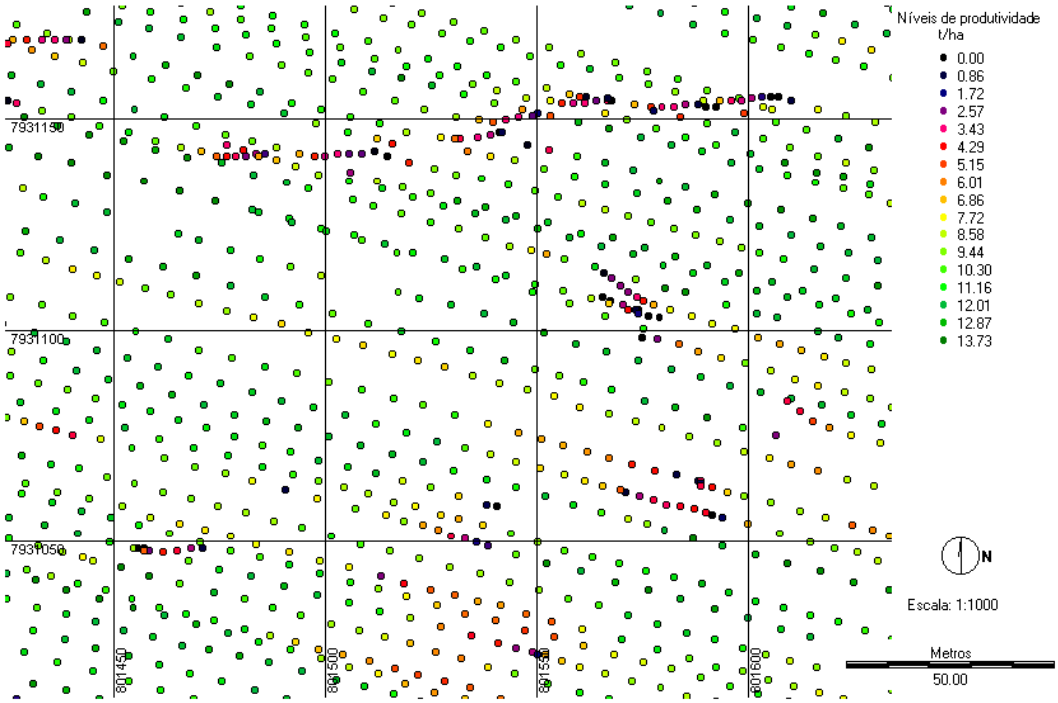


Figura 14. Exemplos de registros inconsistentes de produtividade de milho, identificados pela redução progressiva de valores devido à mobilização de descarga.

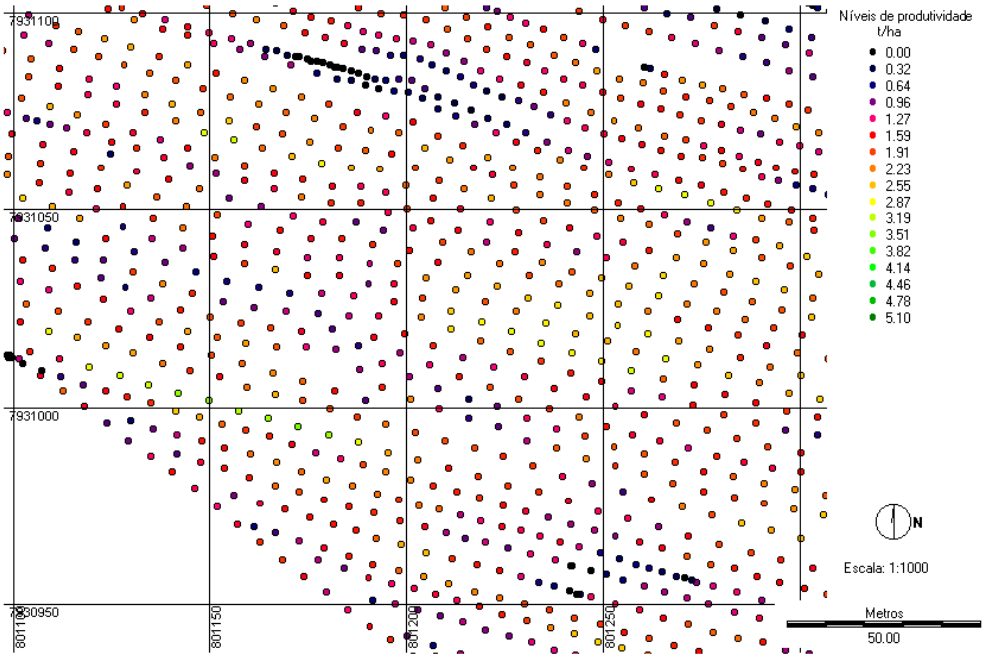


Figura 15. Exemplos de registros de baixa produtividade de soja de difícil associação com a mobilização de descarga ou com deficiência de alimentação da plataforma.

A primeira filtragem dos dados, que incluiu a eliminação de valores nulos e algumas distorções visualmente perceptíveis, não alterou a configuração geral dos mapas, que mantiveram conjuntos individuais de dados em torno de 20.000 pontos. Entretanto, durante o procedimento de modelagem da dependência espacial, foi constatada ainda a presença de erros de posicionamento não detectados nas análises anteriores. Algumas manchas que sugeriram a ausência de registros em certas porções da área em que a colheita foi realizada, bem como a presença de faixas desalinhadas ou mesmo sobreposição de faixas de registros, foram associadas às falhas no recebimento do sinal do sistema DGPS, confirmando as descrições de erros listadas por Pierce & Nowak (1999). Entretanto, muitas das áreas com ausência de pontos ocorreram porque a perda do sinal do sistema DGPS, por períodos relativamente longos ou mesmo momentaneamente, implicou na manutenção da última informação de coordenada registrada, que ia sendo associada aos novos registros de produtividade que eram efetuados pelo monitor de colheita. Foram detectadas seqüências com mais de 100 registros errôneos, algumas das quais foram listadas no Anexo I. Todos eles partilhavam a mesma informação de coordenadas geográficas, numa seqüência que não podia ser percebida no mapa porque o SIG exibiu somente um ponto para cada informação de

coordenadas geográficas, ainda que houvesse inúmeros valores de produtividade diferentes para a mesma coordenada. Porém, ao se submeter estes arquivos ao procedimento geoestatístico, uma mensagem de erro denunciou a possibilidade de existência de mais de um valor de atributo com coordenadas coincidentes (Figura 16).

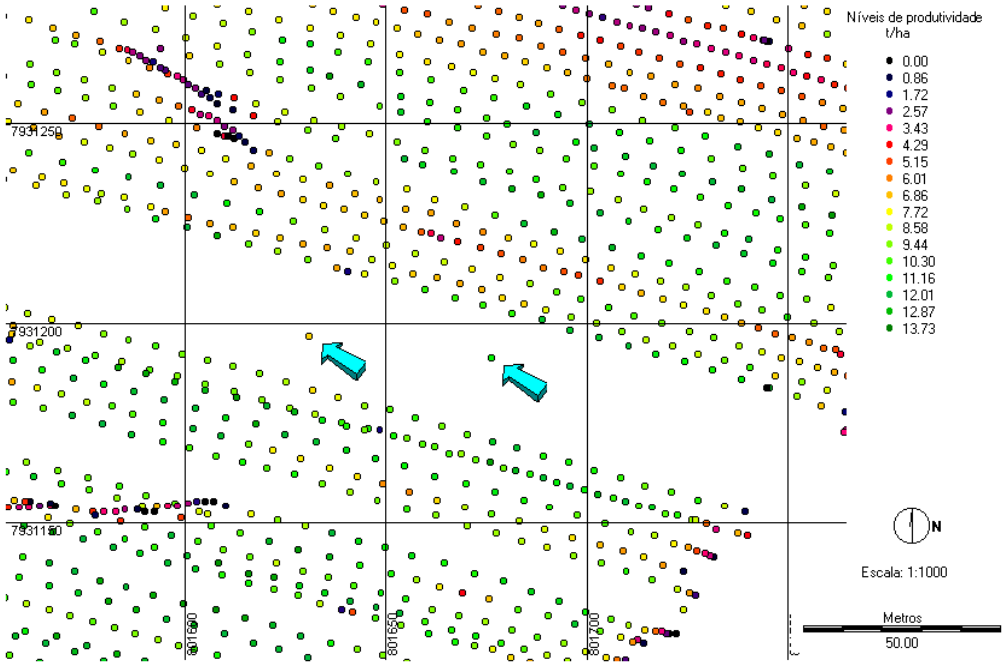


Figura 16. Exemplos de registros únicos para seqüências de pontos com coordenadas repetidas por problemas com o sinal do sistema DGPS.

Desta forma, uma nova exploração dos dados foi efetuada, utilizando-se o programa GS+, que permitiu a localização e remoção de todos os pontos que apresentavam multiplicidade de valores de produtividade para as mesmas coordenadas geográficas. Uma vez que não havia subsídios para a designação de coordenadas prováveis de cada ponto, nada pôde ser feito para um aproveitamento destes dados. Entretanto, como tratava-se de uma informação incompleta, em virtude desses pontos não serem visualizados nos mapas originais, a sua remoção não significou perda de informação disponível. Em termos quantitativos, após todas as filtragens dos dados, os mapas resultantes mantiveram a representatividade das informações trazidas originalmente, ao passo que, qualitativamente, a remoção de dados discrepantes permitiu uma melhor adequação dos conjuntos de dados às análises posteriores (Figuras 17, 18 e 19).

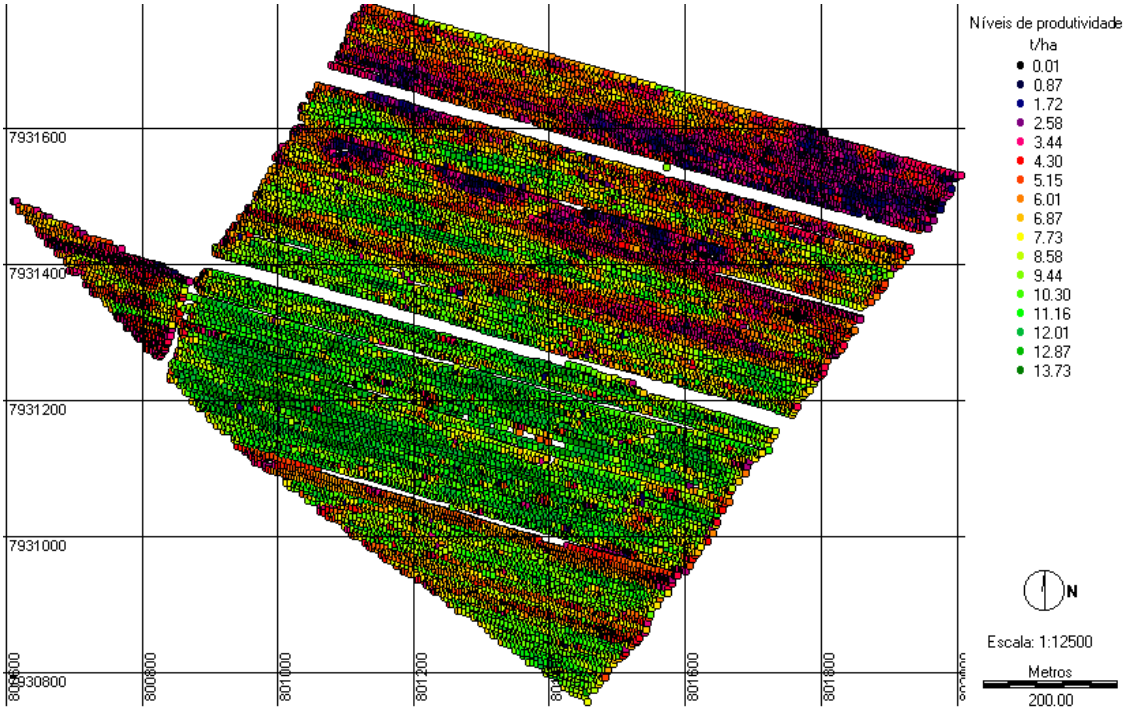


Figura 17. Mapa de produtividade de milho (1998), após eliminação de pontos com valores nulos ou espacialmente discrepantes e linhas de bordadura.

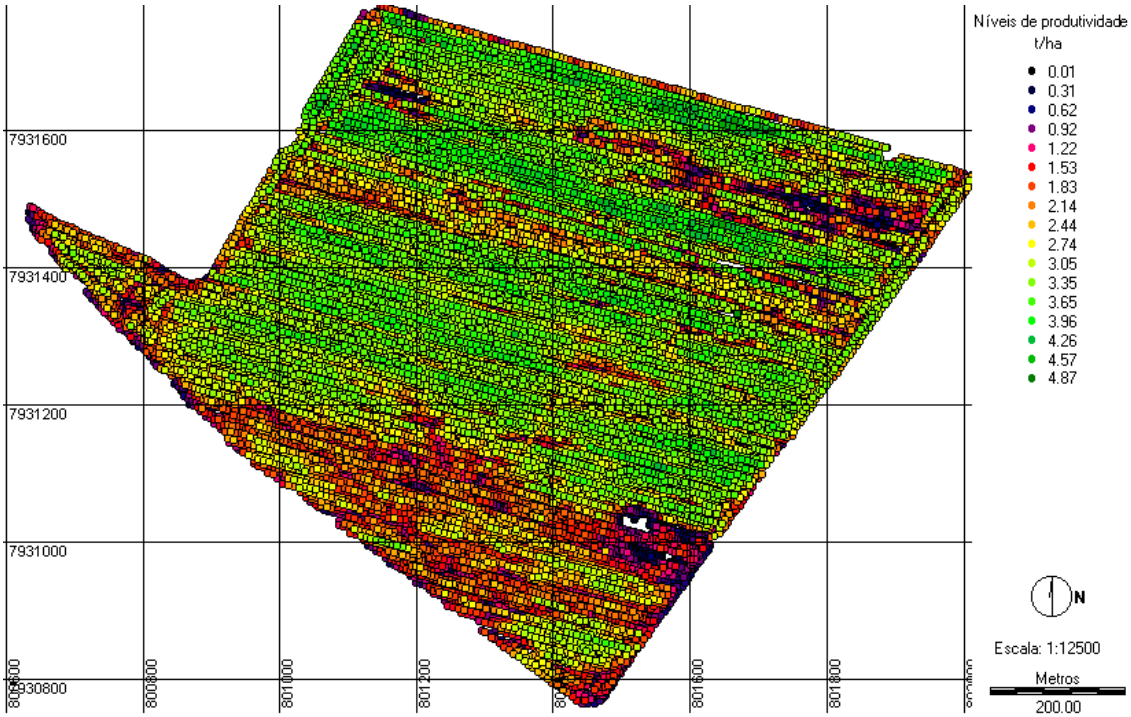


Figura 18. Mapa de produtividade de soja (1999), após eliminação de pontos com valores nulos ou espacialmente discrepantes e linhas de bordadura.

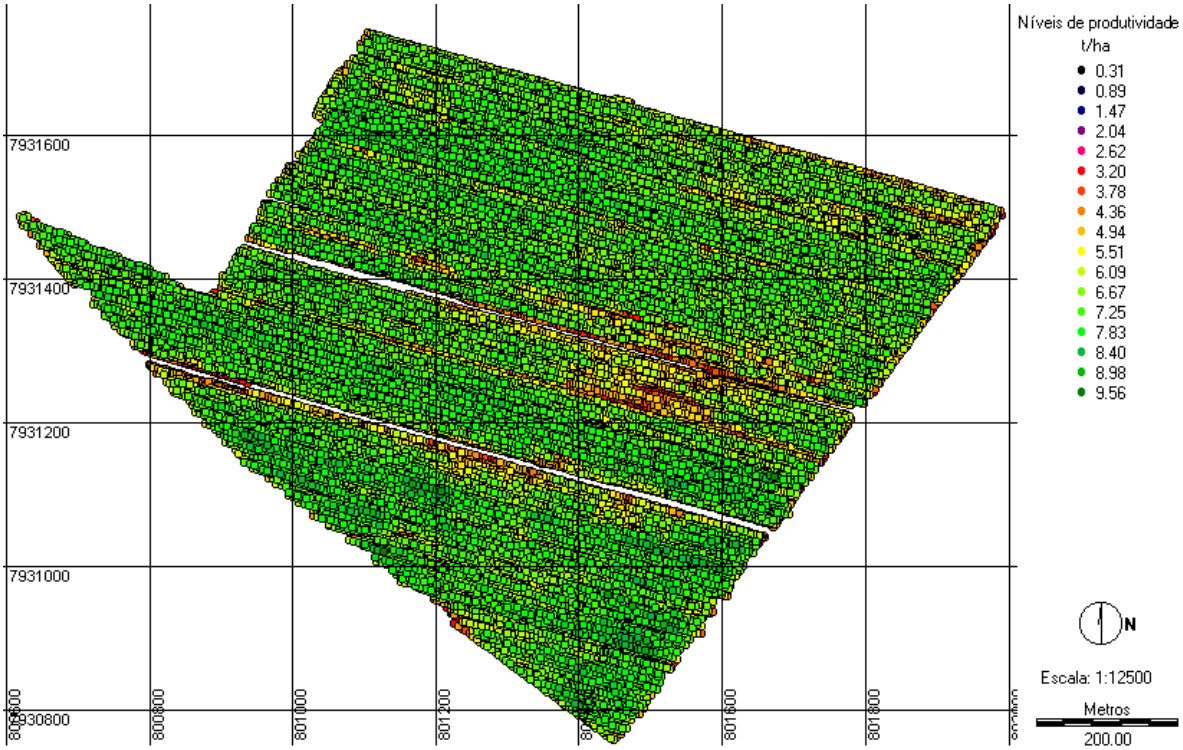


Figura 19. Mapa de produtividade de milho (2000), após eliminação de pontos com valores nulos ou espacialmente discrepantes e linhas de bordadura.

6.2 Análise espacial

6.2.1 Análises geoestatísticas

A análise geoestatística da produtividade foi efetuada a partir dos dados filtrados, apresentados anteriormente nas Figuras 17, 18 e 19, incluindo a eliminação dos registros que possuíam coordenadas repetidas, um problema causado por falhas na recepção e registro do sinal de posicionamento.

O estudo da variabilidade espacial (Quadro 7) revelou que os dados de produtividade expressaram uma dependência espacial bastante consistente, pois abrangeram uma faixa de correlação com distâncias que variaram de 30 a 40 metros, num nível de variabilidade espacial alta (1998) ou média (1999 e 2000), expressos pela proporção da contribuição da semivariância estrutural em relação à semivariância aleatória. Alguns atributos do solo, por sua vez, exibiram estruturas e dependências espaciais diversas, com distâncias de dependência espacial variando entre 130 e 680 metros para atributos químicos. Em

comparação a tais resultados, as análises geoestatísticas efetuadas por Marques Júnior et al. (2000) resultaram em alcances bem mais homogêneos para atributos químicos e físicos de um Latossolo Variação Una, que oscilaram entre 98 e 155 metros.

O nível de variação espacial foi quantificado pelo índice de proporção da semivariância estrutural (%C), sugerido por Gamma Design Softtware (2000), que é a razão entre a contribuição da semivariância estrutural (C) e o patamar da semivariância (Co + C), em termos de porcentagem. Dessa forma, o único atributo que apresentou alta variabilidade (%C maior que 75%) foi a produtividade de milho (1998). Os demais atributos apresentaram um nível médio de variação espacial (a %C ficou entre 25% e 75%). Os dados de Fósforo, analisados como ln (P), não apresentaram correlação espacial para a escala de amostragem realizada.

Os valores do índice de proporção (%C) obtidos para os atributos de solo demonstram que, para os atributos físicos (teores de argila, areia e silte), esse nível foi superior aos valores obtidos para atributos químicos de um modo geral, embora todos tenham expressado um nível médio de variabilidade, conforme pode ser observado no Quadro 7.

Quadro 7. Resultados das análises geoestatísticas para dados de produtividade e atributos de solo.

	Modelo Ajustado				
Atributo	Tipo	Alcance (a)	Patamar (C+Co)	Efeito Pepita (Co)	Proporção [C/(C+Co)]
Prod. de Milho (1998)	Exponencial	32,00m	6,9	1,10	0,84
Prod. de Soja (1999)	Exponencial	31,40m	0,89	0,26	0,71
Prod. de Milho (2000)	Exponencial	41,80m	1,43	0,56	0,61
Argila	Linear	747,17m(*)	53,20	20,68	0,61
Silte	Linear	747,17m(*)	33,71	16,56	0,51
Areia	Linear	747,17m(*)	5,36	1,43	0,73
Matéria Orgânica	Exponencial	130,00m	7,38	4,04	0,46
CTC	Linear	565,10m(*)	87,25	31,44	0,64
Acidez (pH)	Exponencial	145,00m	0,15	0,07	0,50
Saturação por bases	Esférico	357,00m	181,10	72,00	0,60
Cálcio	Esférico	400,00m	47,25	23,62	0,50
Magnésio	Exponencial	686,00m	8,74	4,37	0,50
Potássio	Exponencial	386,00m	0,77	0,39	0,49
Soma de Bases	Esférico	460,00m	92,21	48,10	0,50

(*) O valor do alcance indicado para os modelos lineares correspondem a um valor estimado da dependência espacial, uma vez que o patamar não foi atingido para a escala de amostragem realizada.

A estrutura da correlação espacial é demonstrada pelos semivariogramas experimentais e ajustada conforme os respectivos modelos, exibidos nas Figuras 20, 21 e 22, para os dados de produtividade, e nas Figuras 23 e 24, para os atributos de solo.

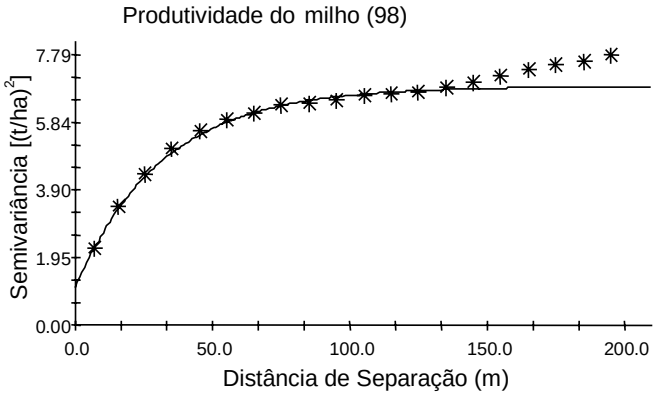


Figura 20. Semivariograma de dados de produtividade de milho (1998).

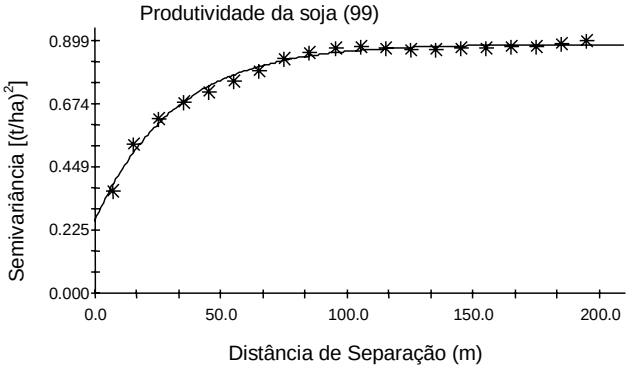


Figura 21. Semivariograma de dados de produtividade de soja (1999).

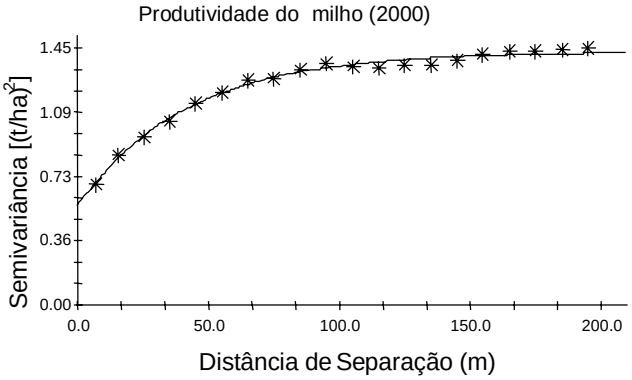


Figura 22. Semivariograma de dados de produtividade de milho (2000).

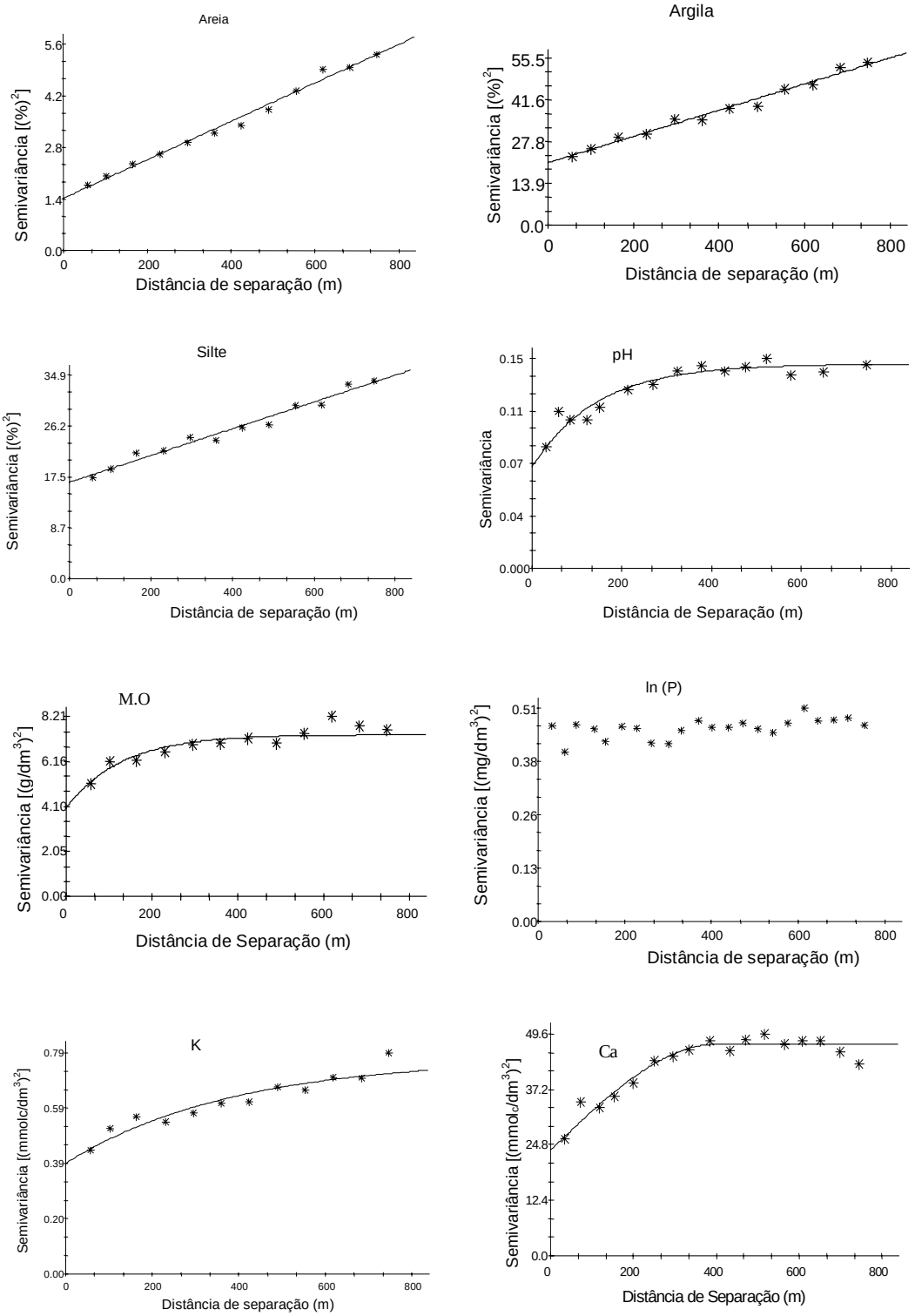


Figura 23. Semivariogramas de atributos de solo: Areia; Argila; Silte; pH; Matéria Orgânica; Fósforo (como Ln(P)); Potássio; e, Cálcio.

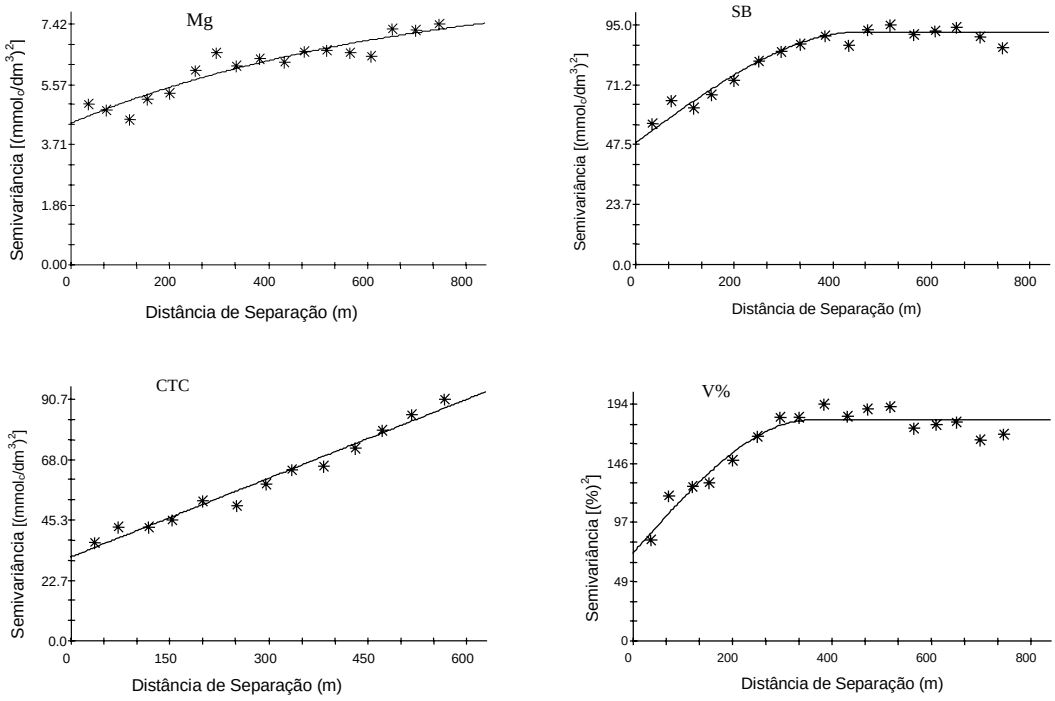


Figura 24. Semivariogramas de atributos de solo: Magnésio; Soma de Bases; CTC; e, Saturação por Bases (V%).

A análise da variação conjunta de dois anos agrícolas entre si foi efetuada para investigar como a correlação entre a produtividade de duas safras variou no espaço e no tempo. Devido à precisão do registro das coordenadas geradas pelo sistema DGPS, é muito remota a possibilidade de haver um volume adequado de dados de produtividade com coordenadas originais exatamente coincidentes. A alternativa para obter-se uma padronização de coordenadas de modo a atingir a convergência de parte dos pontos de cada ano consistiu em uma conversão seqüencial de formatos (vetorial/raster/vetorial). Isso permitiu que os pontos que ocupavam as células com as mesmas coordenadas, ainda que em dois dos três anos analisados, pudessem ser utilizados pelo programa geoestatístico, uma vez que o retorno ao formato vetorial condicionou a representação do ponto à coordenada central da célula que o originou. Ainda que este procedimento promovesse o deslocamento da posição individual dos pontos, esse deslocamento poderia ser em qualquer sentido e os pontos convergentes estiveram bem esparsos, o que levou a crer que não houve influência desta alteração para a análise de dependência espacial.

Os cálculos foram efetuados somente com os dados coincidentes entre

os três conjuntos de dados (Figuras 25, 26 e 27). Ainda assim, a quantidade de dados disponíveis foi suficiente para refletir a tendência de variação expressa pelos conjuntos completos de dados.

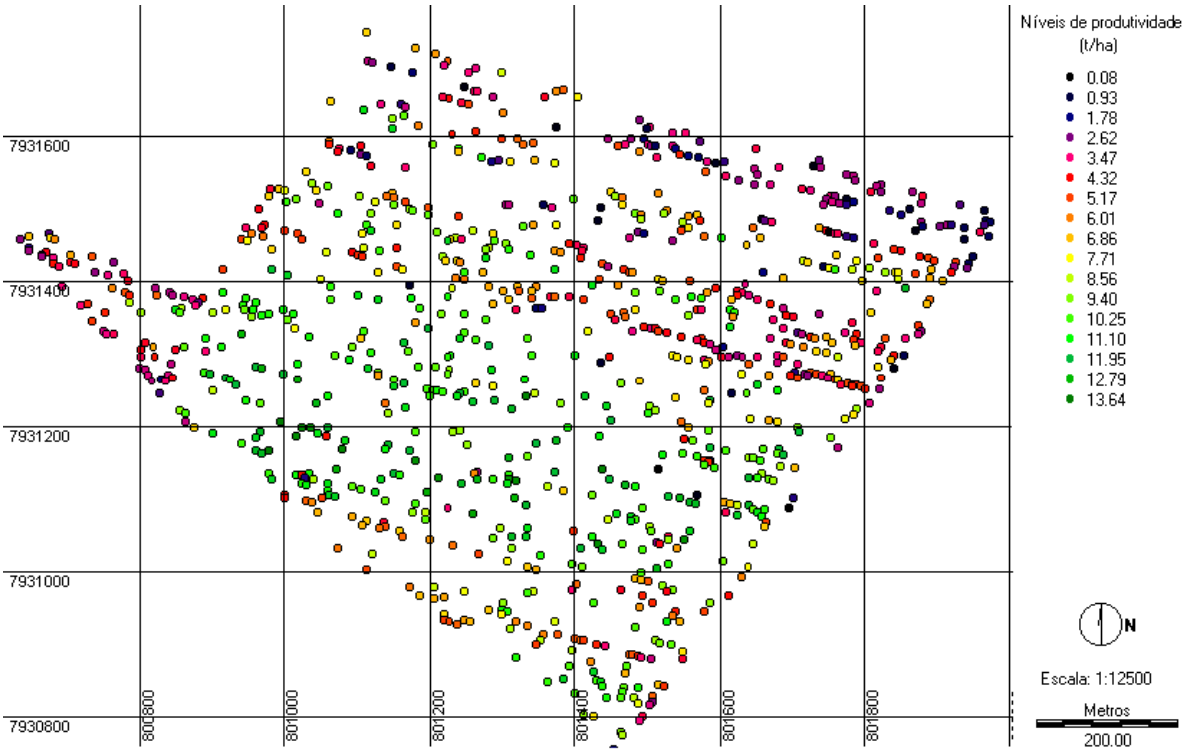


Figura 25. Pontos coincidentes de 1998 para o cálculo do semivariograma cruzado .

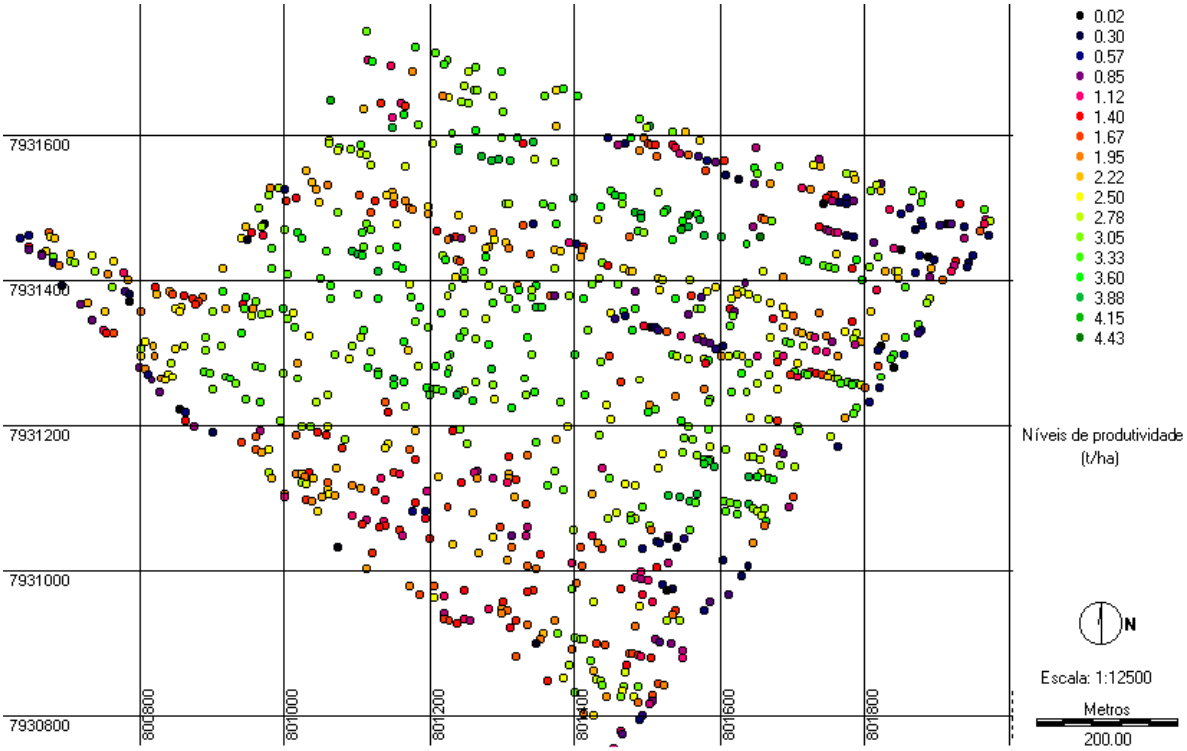


Figura 26. Pontos coincidentes de 1999 para o cálculo do semivariograma cruzado .

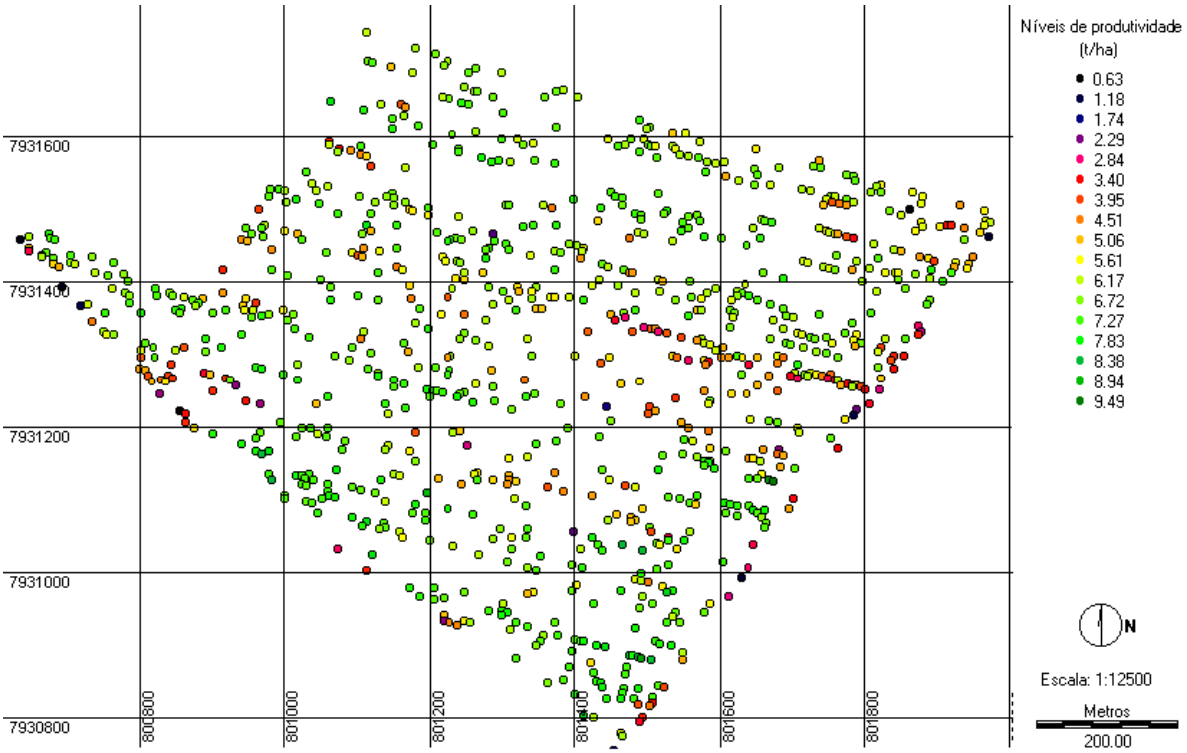
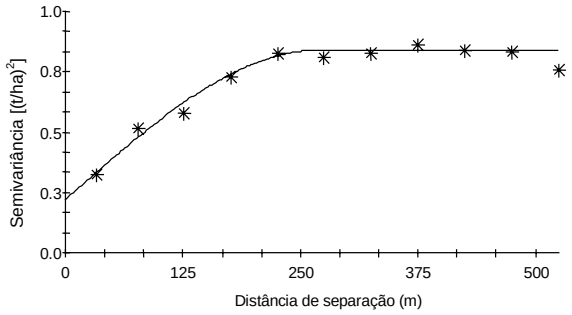


Figura 27. Pontos coincidentes de 2000 para o cálculo do semivariograma cruzado .

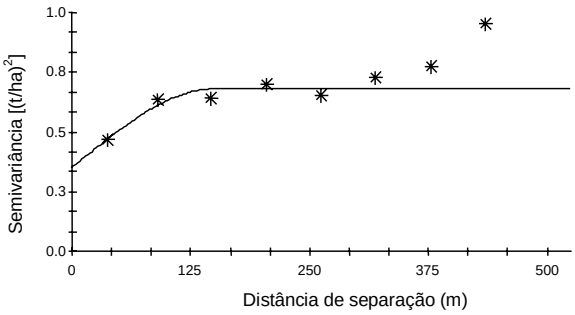
Os resultados positivos dos semivariogramas cruzados, exibidos nas Figuras 28, 29 e 30 e compilados no Quadro 8, revelaram que os valores de produtividade entre os anos estudados, dois a dois, foram positivamente relacionados, ou seja, um aumento ou decréscimo no valor da produtividade de um ano da posição x_i para $x_i + h$ tendeu a ser associado, respectivamente, com acréscimo ou decréscimo no valor da produtividade do outro ano para os mesmos locais. Ainda assim, a correlação espacial entre os valores de produtividade, quando se considerou a variação conjunta dos anos de 1998 e 1999 (Figura 26), foi mais expressiva do que a correlação espacial exibida pela variação conjunta de produtividade dos anos de 1998 e 2000 (Figura 27) e ainda mais quando comparada com a dos anos de 1999 e 2000, conjuntamente (Figura 28), uma vez que a semivariância, calculada para os anos de 1998 e 1999, tendeu a crescer de forma mais evidente com o incremento da distância do que a calculada para as outras combinações.



Esférico (Co = 0,22; Co + C = 0,84; a = 270,00)

Distância de separação (m)

Figura 28. Semivariograma cruzado para milho 98 e soja 99.



Esférico (Co = 0,35; Co + C = 0,68; a = 150,00)

Figura 29. Semivariograma cruzado para milho 98 e milho 2000.

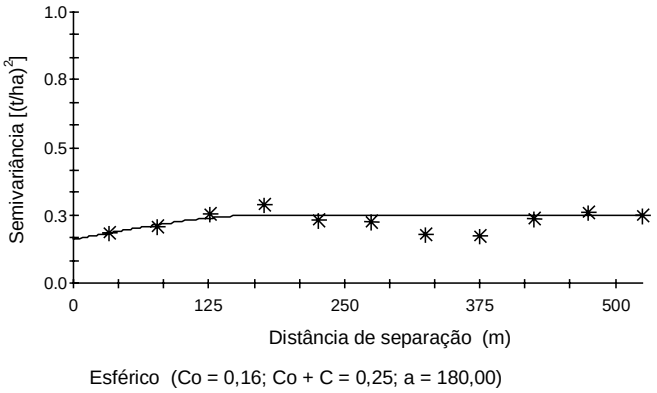


Figura 30. Semivariograma cruzado para soja 99 e milho 2000.

Quadro 8. Resultados das análises geoestatísticas para dados de produtividade (semivariogramas cruzados).

	Modelo Ajustado				
Atributo	Tipo	Alcance (a)	Patamar (C+Co)	Efeito Pepita (Co)	Proporção [C/(C+Co)]
Prod. milho (98) x soja (99)	Esférico	270,00m	0,84	0,22	0,74
Prod. milho (98) x Milho (00)	Esférico	150,00m	0,68	0,35	0,49
Prod. soja (99) x Milho (00)	Esférico	180,00m	0,25	0,16	0,36

6.2.2 Interpolação dos dados de produtividade milho e soja

A interpolação dos dados de produtividade, efetuada a partir da modelagem da estrutura espacial detectada pela análise geoestatística, deu origem aos mapas com a informação da produtividade de cada ano para toda a área monitorada, numa grade de 6,76 m^2. Stafford et al. (1996), produzindo mapas interpolados de produtividade, adotaram uma grade de 1 m^2, quando a largura de corte da plataforma foi de 4m. Pela interpolação, além das faixas existentes entre as fileiras de pontos registrados pelo monitor de colheita, as regiões internas da área que acusavam a ausência das respectivas fileiras de dados tiveram seus valores estimados através da técnica da krigagem ordinária, utilizando-se o modelo ajustado para cada semivariograma.

Entretanto, para a safra de 2000, na porção superior da área trabalhada não foram obtidos dados de produtividade das últimas faixas colhidas, devido a um problema com a recuperação dos registros gravados no cartão do sistema de monitoramento de colheita (Figura 31). Desta forma, o resultado da interpolação, efetuada além das últimas fileiras que

possuíam dados, não foi satisfatório, devido à escassez de pontos abrangidos pelo alcance de dependência espacial, os quais comporiam o número de vizinhos utilizados pelo estimador para a estimativa mais representativa dos valores desconhecidos.

Por essa razão, o perímetro da área foi reconsiderado. A adoção da abrangência do último conjunto de dados permitiu a restrição dos valores presentes na superfície interpolada a um limite comum de área colhida para as três safras. Isso acarretou numa perda a mais de informações nos mapas dos anos anteriores. Porém, garantiu uma maior confiança nas informações que seriam utilizadas para as análises das variações exibidas no decorrer do período.

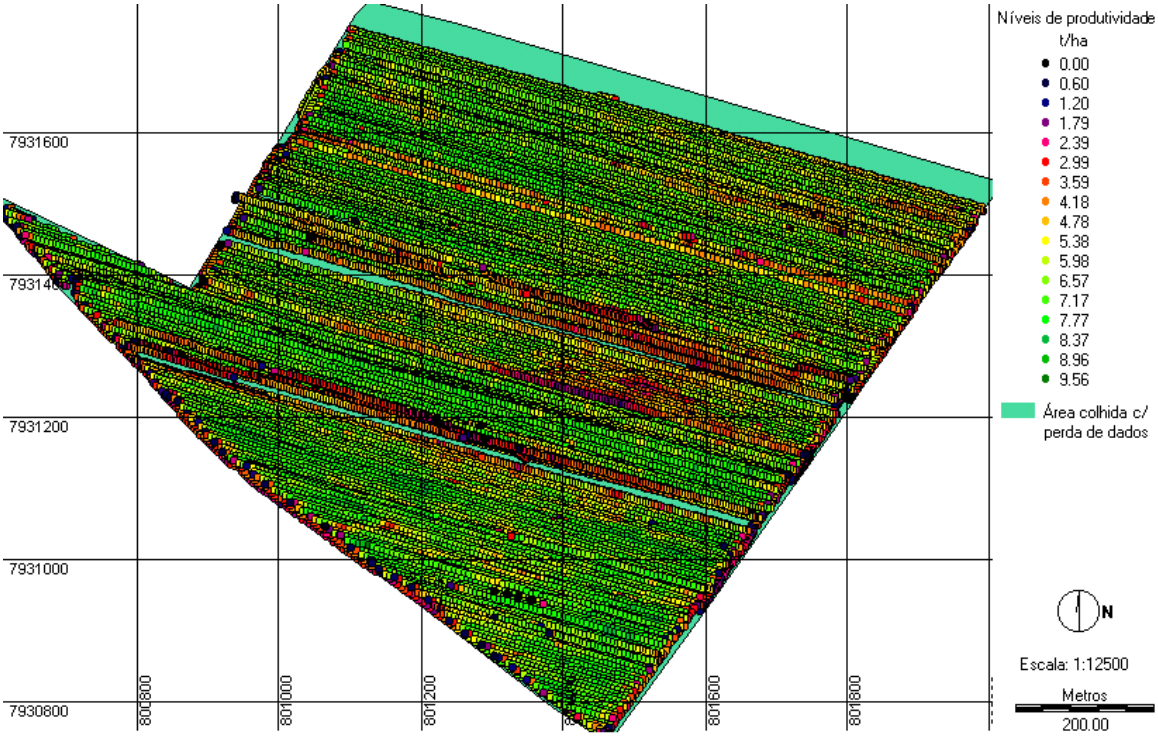


Figura 31. Ausência de dados devido a problemas no cartão de registro.

Cada imagem interpolada pôde então ser delimitada pelo novo perímetro, de modo a exibir o mapeamento da produtividade como uma superfície contínua, a partir das quais as demais análises foram efetuadas. As Figuras 32, 33 e 34 expressam o resultado da interpolação dos valores de produtividade gerados pela técnica da krigagem

ordinária. A validação cruzada (Davis, 1987) foi utilizada para verificar a adequação dos modelos ajustados para cada conjunto de dados. A correlação entre valores observados e valores preditos pelo modelo ajustado foi de 0,89 para a safra de 1998 (milho), 0,84 para a safra de 1999 (soja) e de 0,78 para a safra de 2000 (milho). Esse decréscimo da correlação foi condizente com a redução na proporção da semivariância estrutural, observada para os respectivos semivariogramas, que registraram, respectivamente, valores de 0,841, 0,709 e 0,609 para os anos de 1998, 1999 e 2000. Ou seja, quanto menor a proporção da semivariância estrutural menor será a capacidade do modelo ajustado de estimar valores semelhantes aos valores observados para os mesmos pontos, por melhor que seja o ajuste do modelo sobre o semivariograma experimental.

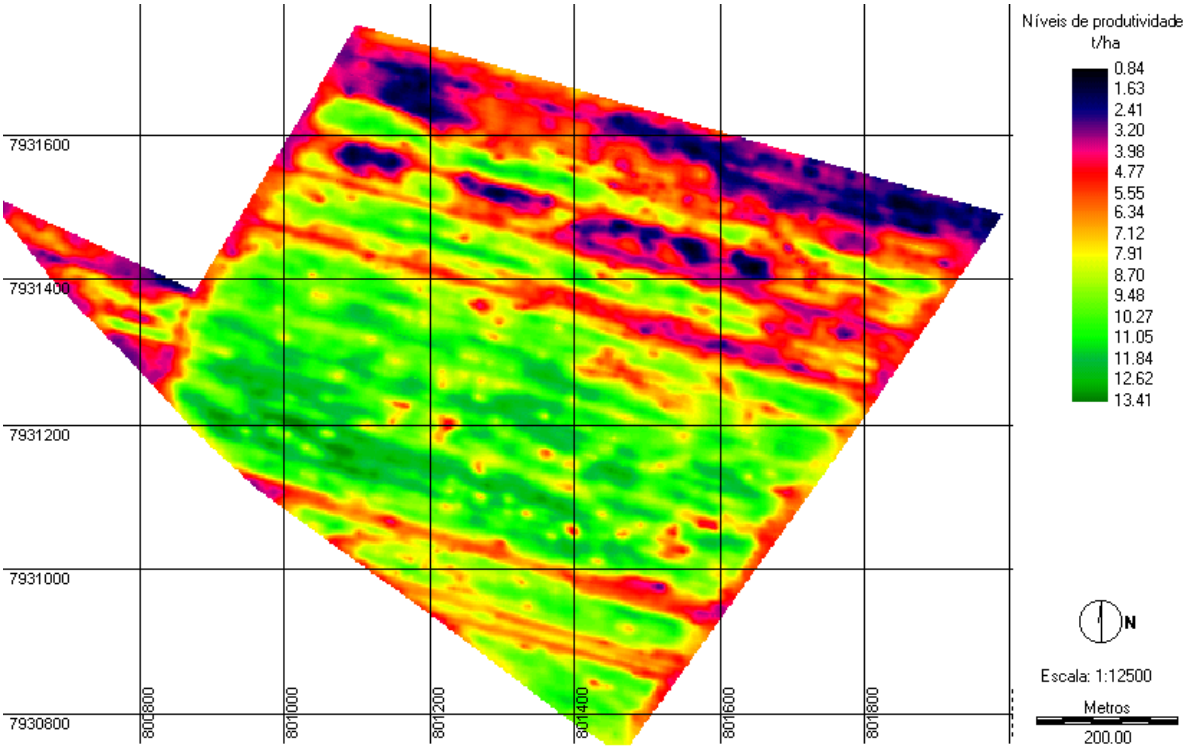


Figura 32. Mapa de produtividade de Milho (1998), interpolado por krigagem.

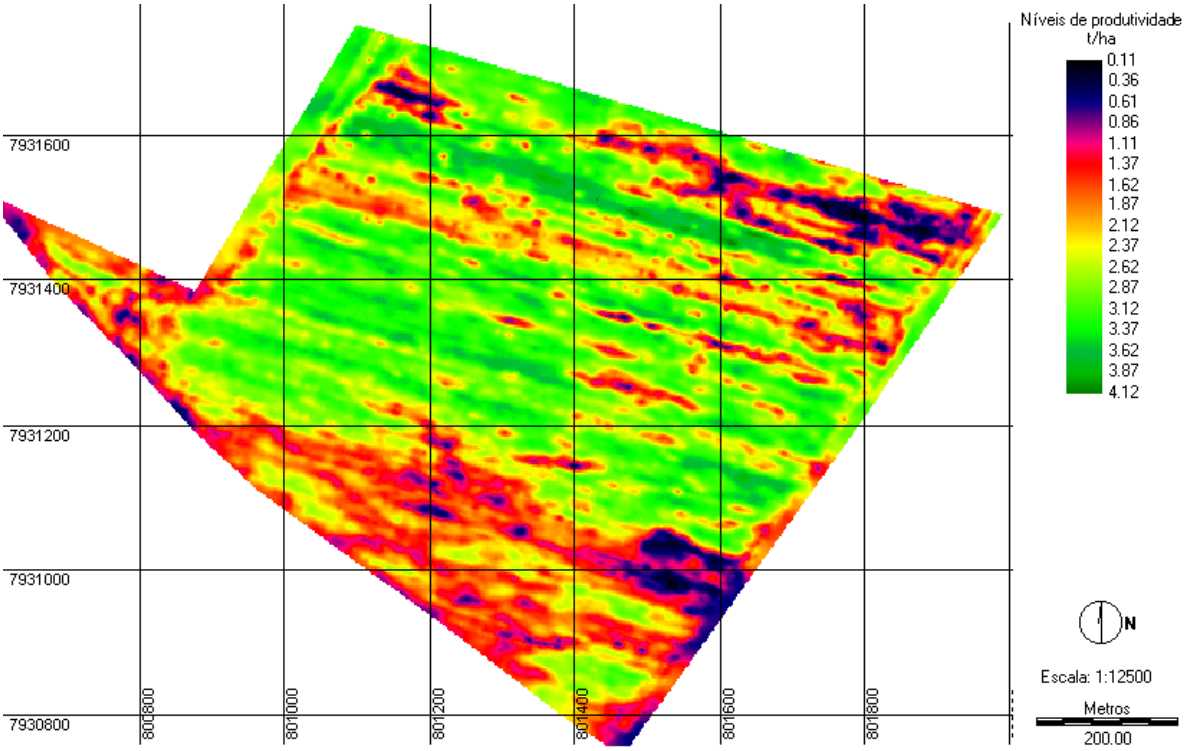


Figura 33. Mapa de produtividade de Soja (1999), interpolado por krigagem.

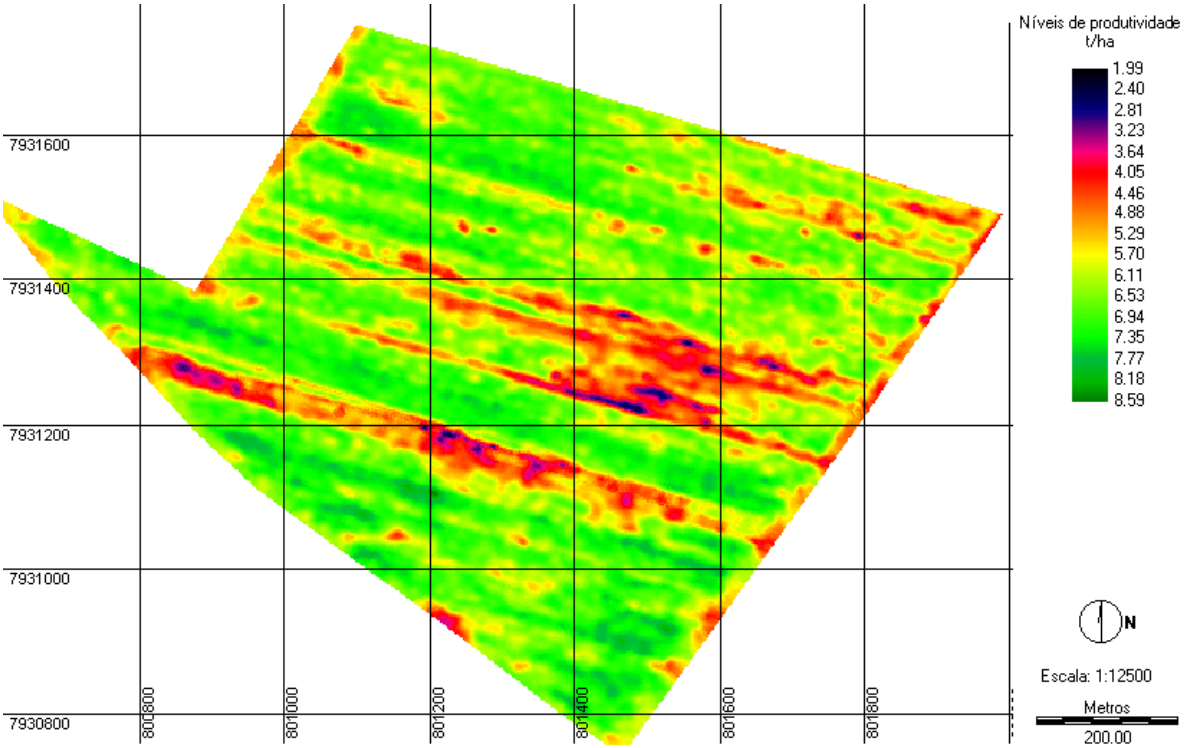


Figura 34. Mapa de produtividade de Milho (2000), interpolado por krigagem.

Maiores correlações implicam em suavizações menos acentuadas quando da interpolação da superfície, de modo que a amplitude de variação dos valores da superfície gerada não se distancia muito da amplitude de variação dos valores utilizados para a interpolação. No caso da produtividade de milho em 1998, os valores considerados para a krigagem variaram entre 0,01 e 13,73 t/ha, enquanto a superfície gerada exibiu valores entre 0,84 e 13,41 t/ha (8% inferior). Para valores de produtividade de soja em 1999, a amplitude de variação dos valores considerados para a krigagem diferiu em 17% da amplitude dos valores exibidos pela krigagem, quando os valores observados variaram entre 0,01 e 4,87 t/ha, ao passo que os valores estimados ficaram entre 0,11 e 4,12 t/ha. A maior diferença de amplitude para valores originais e valores estimados, de cerca de 28%, foi exibida pela safra de milho em 2000, quando os valores medidos utilizados na análise geoestatística variaram entre 0,31 e 9,56 t/ha e a krigagem restringiu a estimativa destes valores entre 1,99 e 8,59 t/ha (Figuras 32, 33 e 34). Conforme observaram também Fietz et al. (2000), ao estimar valores de necessidade de calcáreo, quanto maior for o efeito pepita em relação ao patamar de semivariância, maior será esta tendência de superestimar os valores menores e subestimar os maiores, quando da utilização desta técnica de interpolação.

6.2.3 Padronização dos dados de produtividade de milho e soja

A análise de dados de produtividade exige a padronização dos valores, não só por se tratar de culturas diferentes em rotação, como também por não se manterem as mesmas condições de produção de um ano para outro, quando variam as condições climáticas, o nível e a periodicidade de tratos culturais, épocas de semeadura e de colheita, tipo de insumos utilizados, entre outros. Assim, efetuou-se a padronização dos dados interpolados, que passaram a exibir os valores constantes das Figuras 35, 36 e 37. Essas três imagens foram então agrupadas em uma imagem única (Figura 38), num procedimento que associa a cada uma das células uma matriz contendo os valores padronizados de produtividade dos três anos. A exemplo de uma imagem de satélite, cuja imagem composta exibe as mesmas feições captadas pelos diversos sensores em diferentes faixas de comprimento de onda (bandas), a imagem composta da produtividade é a base sobre a qual efetua-se um procedimento de classificação para isolar cada uma das aparentes regiões que estão presentes na imagem composta, cada uma apresentando um maior ou menor nível de definição dos seus limites.

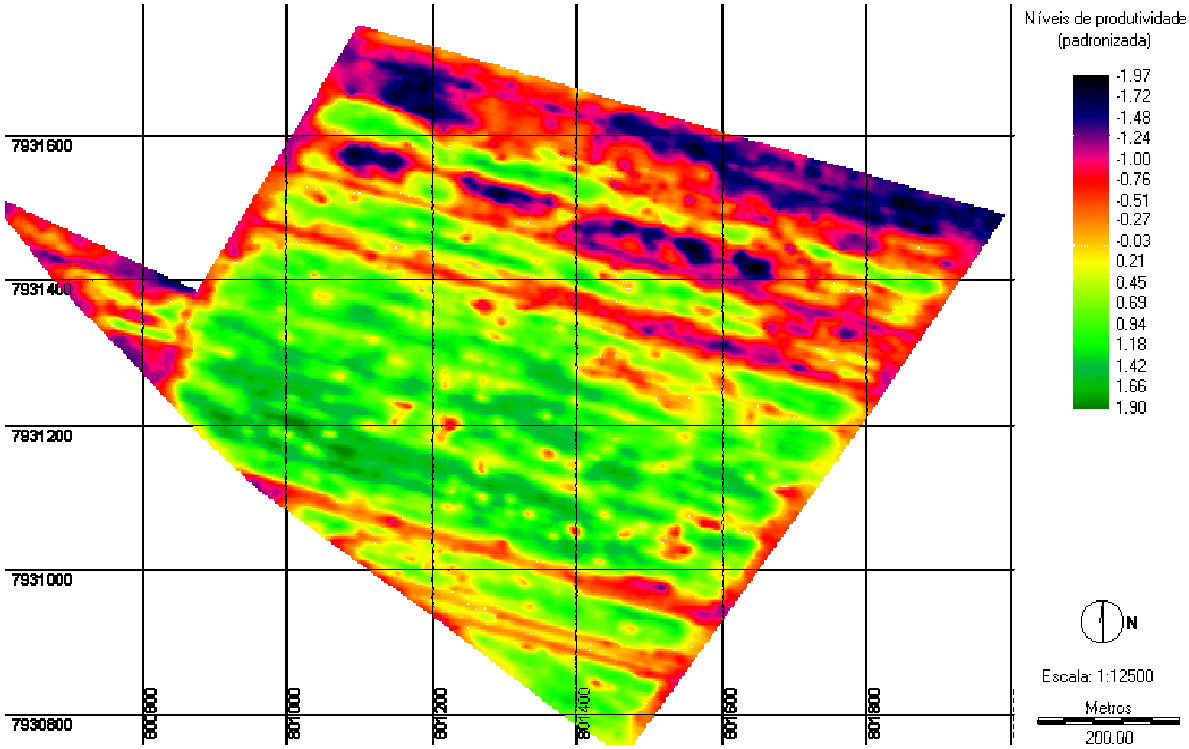


Figura 35. Mapa de produtividade de Milho (1998) padronizada após a interpolação.

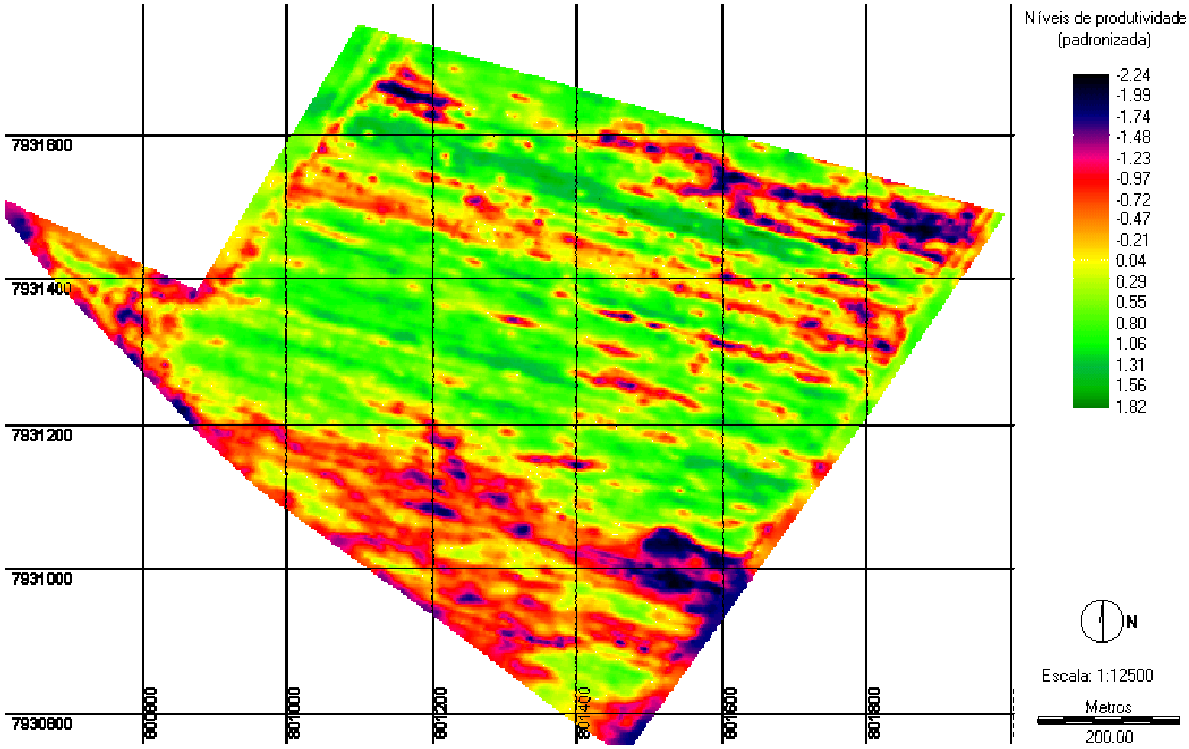


Figura 36. Mapa de produtividade de Soja (1999) padronizada após a interpolação.

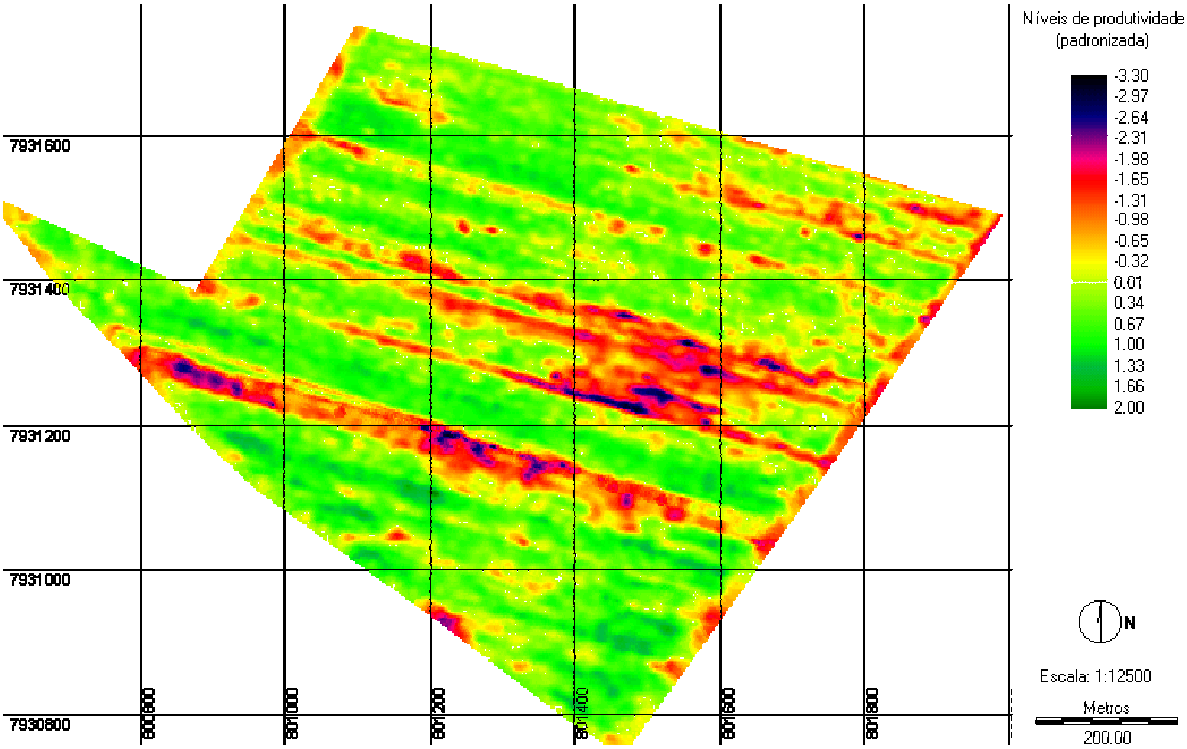


Figura 37. Mapa de produtividade de Milho (2000) padronizada após a interpolação.

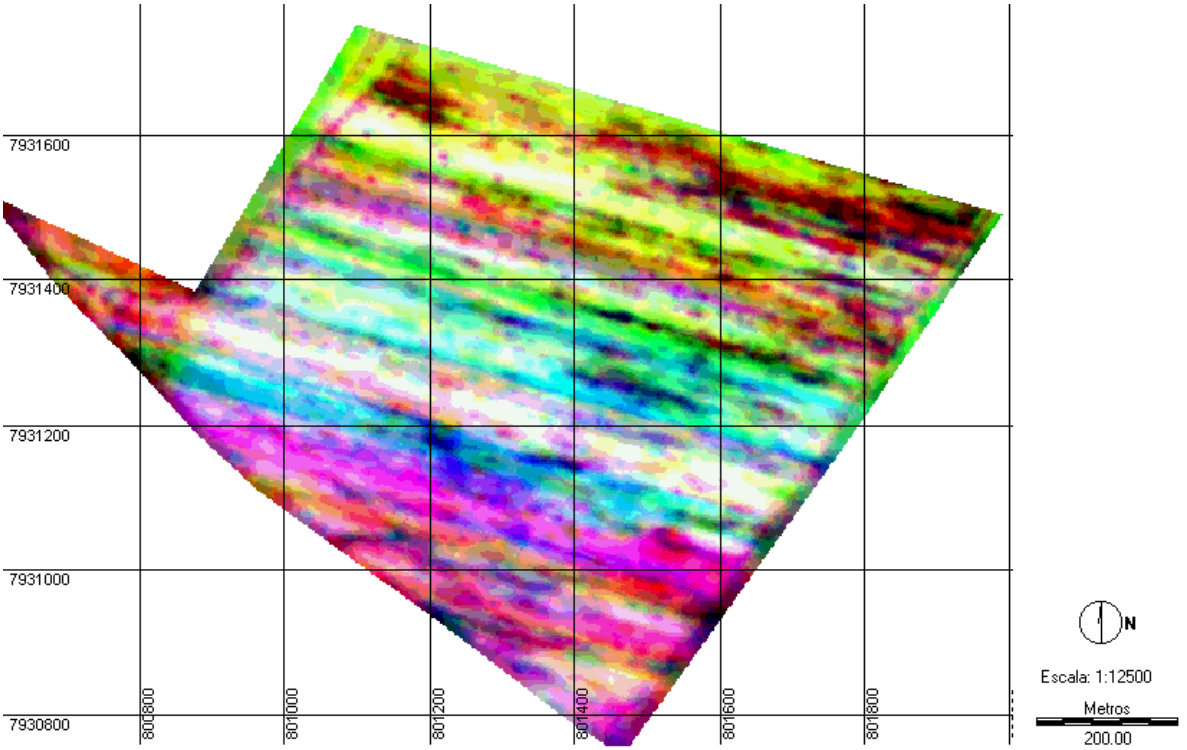


Figura 38. Imagem da composição dos três mapas de produtividade no formato RGB, onde cada célula registra o vetor com o valor padronizado dos três anos.

A abundância de cores da imagem composta revelou a aparentemente fraca correlação ponto a ponto entre os valores de produtividade das duas culturas no decorrer das três safras. Neste aspecto, houve concordância com os resultados obtidos nos estudos de Lark & Stafford (1997) e Stafford et al. (1996), nos quais, apesar de a mesma cultura ter sido cultivada por alguns anos, a correlação da produtividade entre safras sucessivas nos pontos ao longo do campo foi baixa.

6.2.4 Análise de agrupamentos de dados de produtividade de milho e soja

A execução do procedimento de análise de agrupamento, considerando o critério da classificação mais ampla, ofereceu a definição de um grande número de agrupamentos (Figura 39), para os quais seria muito difícil tentar associar qualquer tipo de interpretação. Devido à indicação de uma fraca evidência de agrupamento dos dados, exibida especialmente pelos oito agrupamentos finais, adotou-se a restrição quanto ao número máximo de agrupamentos. Baseando-se na maior participação dos agrupamentos iniciais exibidos no histograma, a classificação foi efetuada com o máximo de quatro agrupamentos. Ao efetuar a classificação de mapas de produtividade, Stafford et al. (1999) afirmaram que um número arbitrário de agrupamentos seria selecionado (usualmente 4) quando houvesse a indicação de uma evidência mais fraca de agrupamento dos dados.

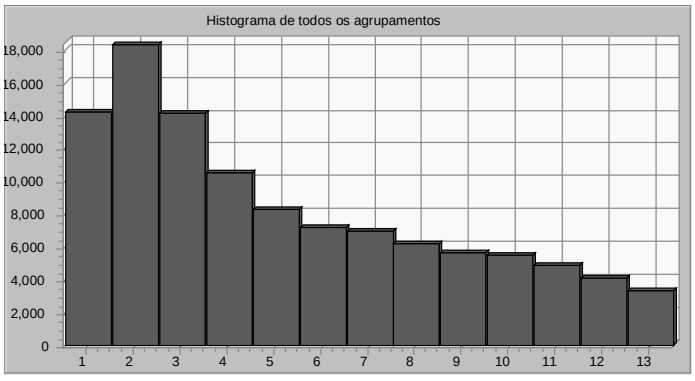


Figura 39. Histograma de todos os agrupamentos exibidos pela imagem composta da produtividade pela classificação ampla.

Assim, através da análise de agrupamentos, a área de estudo foi dividida em 4 sub-regiões (Figura 40). Observa-se que cada um dos agrupamentos não se concentra totalmente em uma única porção da área, mas estão relativamente dispersos em toda

a extensão. Percebe-se a inserção de pequenas manchas de agrupamentos diferentes numa mancha maior, como pode ser observado nas manchas centrais do agrupamento 3. Neste caso, as sub-regiões poderiam ser definidas a partir de um agrupamento predominante, englobando aquelas manchas de menor dimensão. É visível, também, a influência da orientação do alinhamento das faixas de corte na definição das manchas de cada agrupamento, ou seja faixas longitudinais paralelas, mantendo a tendência de representar o sentido de deslocamento da máquina.

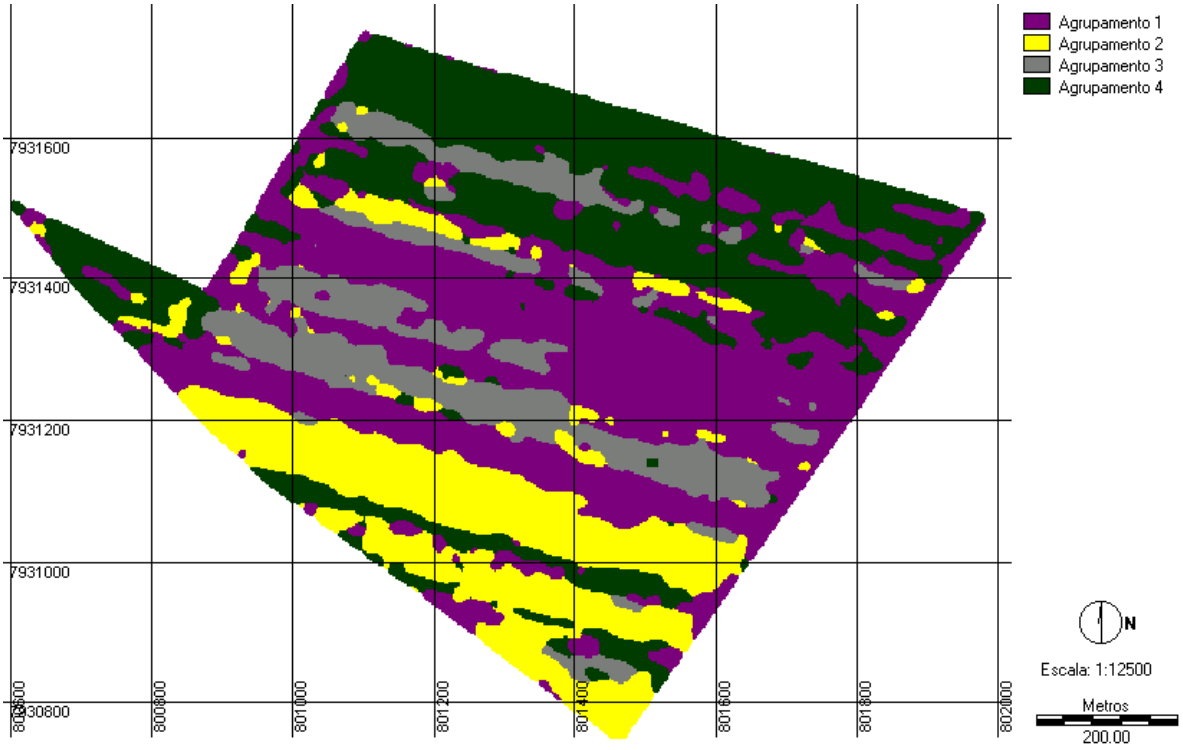


Figura 40. Sub-regiões (agrupamentos) definidas automaticamente pela análise de agrupamentos a partir da imagem da composição dos mapas de produtividade.

A obtenção de agrupamentos a partir de uma seqüência mapas de produtividade possibilitou visualizar uma fragmentação da área, não restrita somente a possíveis regiões de alta ou baixa produtividade. De modo semelhante, usando um procedimento de análise de agrupamentos para classificar mapas seqüenciais de produtividade de diferentes campos, Stafford et al. (1999) concluíram que o processo de agrupamento realizado sobre os mapas de produtividade reconheceu sub-regiões dos campos com distintos padrões de variação na produtividade entre as safras estudadas, e que por vezes esses padrões

não corresponderam a produtividades consistentemente altas ou baixas em safras sucessivas. Segundo os autores, isto demonstrou a superioridade de um método de agrupamento - que não faz suposições a respeito dos padrões de variação entre as safras, mas simplesmente identifica-os - em comparação com uma estratégia de analisar seqüências de mapas de produtividade computando as médias de um conjunto de safras.

A relativa descontinuidade das manchas exibidas na Figura 40 leva a crer que, ainda que se identifique cada um desses agrupamentos, reconhecendo qual é o comportamento da produção que levou à definição da posição e do formato de cada mancha, uma seqüência de mapas de produtividade pode não indicar necessariamente o manejo adequado a ser adotado de modo suficientemente confiável, devido ao padrão da variabilidade espacial e temporal ser confuso.

Ainda que se distinga um certo padrão de variabilidade no decorrer dos anos, as causas da variação, se não puderem ser identificadas prontamente, irão exigir um esforço ainda mais intenso na tentativa de sua elucidação. Além disso, a empreitada para desvendar possíveis causas de variação dos fatores de produção deve ser justificada pelo aporte de recursos necessários para a investigação em comparação com o nível de variabilidade que está sendo considerado e a abrangência da área a ser tratada. É o que demonstram os resultados de Blackmore (2000), que classificou uma série de 6 mapas de produtividade em 3 comportamentos da produtividade, definidos como: produtividades superiores e estáveis; produtividades inferiores e estáveis; e, produtividades instáveis. Para a classificação foram combinados mapas de tendência espacial e de estabilidade temporal, a partir de dados padronizados de produtividade. Segundo o autor, apenas 0,2 ha (2,5% da área estudada) foram classificados como região de instabilidade na produtividade, resultado considerado inconsistente em termos de manejo, ou economicamente inviável para tratamento localizado.

6.2.5 Determinação das classes de comportamento da produtividade de milho e soja

Para tentar interpretar cada uma das sub-regiões, estudou-se o comportamento da produtividade como uma forma concomitante de classificação dos mesmos dados, efetuando-se a classificação dos valores padronizados da produtividade de cada ano

segundo o critério de produtividades abaixo da média, em torno da média e acima da média (Figuras 41, 42 e 43).

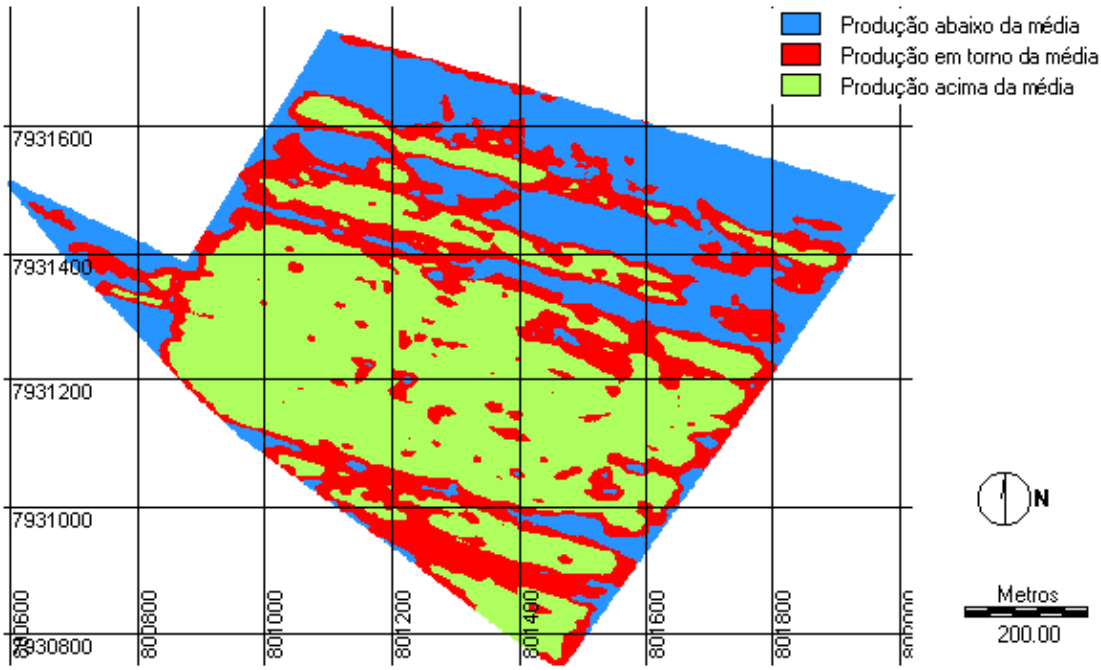


Figura 41. Classes de produtividade padronizada para Milho (1998)

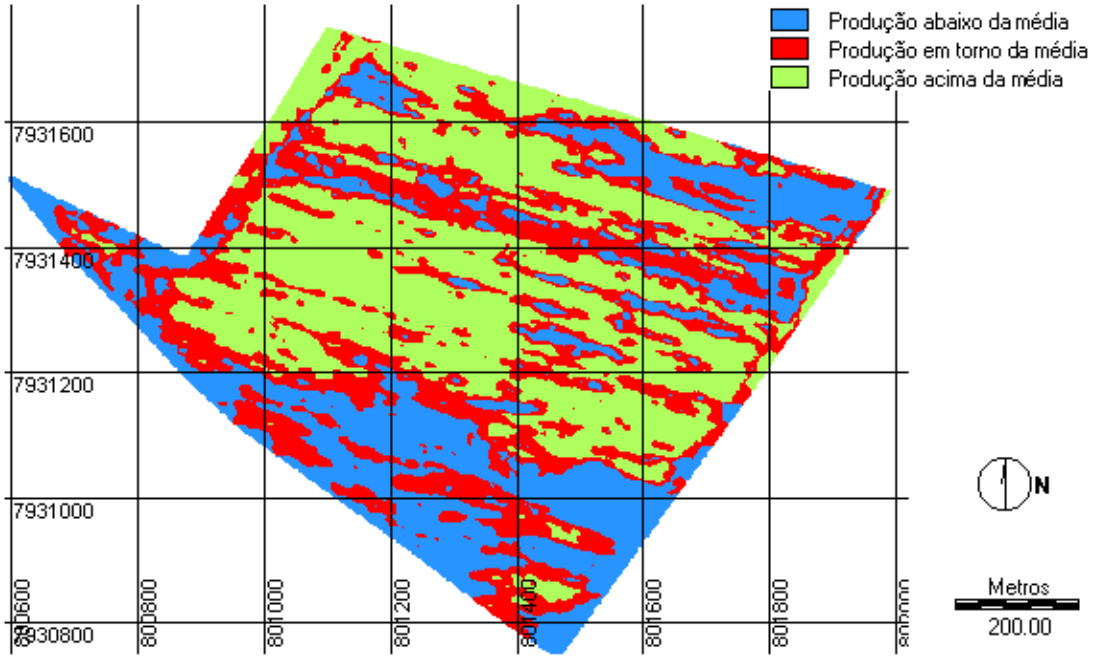


Figura 42. Classes de produtividade padronizada para Soja (1999)

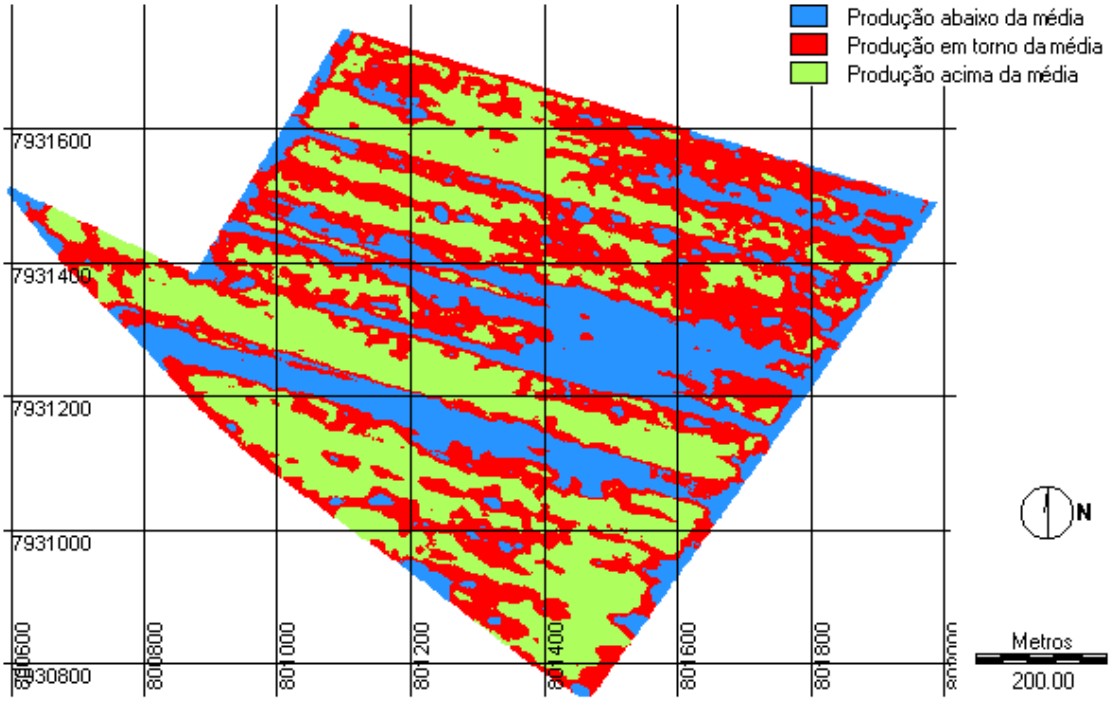


Figura 43. Classes de produtividade padronizada para Milho (2000)

As combinações resultantes do cruzamento destes três mapas foram analisadas com o auxílio da planilha eletrônica, de forma a identificar os possíveis comportamentos que pudessem ser classificados. Inicialmente foram identificados os seguintes comportamentos: a) produtividades ascendentes (incluindo produtividades estagnadas acima da média); b) produtividades descendentes (incluindo produtividades estagnadas abaixo da média); c) produtividades com oscilação ascendente/descendente (incluindo produtividades estagnadas em torno da média); e, d) produtividades com oscilação descendente/ascendente. Entretanto, com estes conceitos, a imagem resultante não apresentou muita semelhança com a imagem de agrupamentos. Uma vez que estes conceitos não deixam de ser definidos de modo relativamente arbitrário, caso o resultado da classificação a partir destas definições tivesse exibido um padrão de arranjo espacial adequado ao processo de interpretação dos agrupamentos, regiões de produtividade elevada poderiam realmente ser tratadas como áreas de produtividade ascendente. Entretanto, ao se considerar isoladamente as regiões de produtividade mais elevada em todos os anos, verificou-se uma possível associação das áreas ocupadas por esta classe com um determinado agrupamento.

A partir desta constatação, procedeu-se a uma nova definição de comportamentos da produtividade, caracterizando-se como uma classe distinta as regiões de produtividade acima da média em todos os anos ou com produtividade elevada em dois deles, mantendo produtividade em torno da média no terceiro. Com isso, a classe de comportamento de produtividade ascendente passou a incluir regiões de produtividade estagnada em torno da média, ao invés de produtividade estagnada acima da média. A classe de comportamento de produtividade descendente permaneceu inalterada. Por sua vez, as classes de comportamento de produtividade oscilante foram agrupadas, deixando de incluir as regiões de produtividade estagnada em torno da média, como mencionado anteriormente. O quadro com todas as combinações e os respectivos comportamentos definidos encontra-se no Anexo II. A adoção destes novos conceitos para a classificação do comportamento da produtividade resultou em uma imagem mais próxima daquela gerada pela análise de agrupamentos (Figura 44), permitindo que se efetuasse um cruzamento entre estas duas imagens, de modo a obter o nível de correspondência entre cada agrupamento e a classe de comportamento que melhor o identificaria.

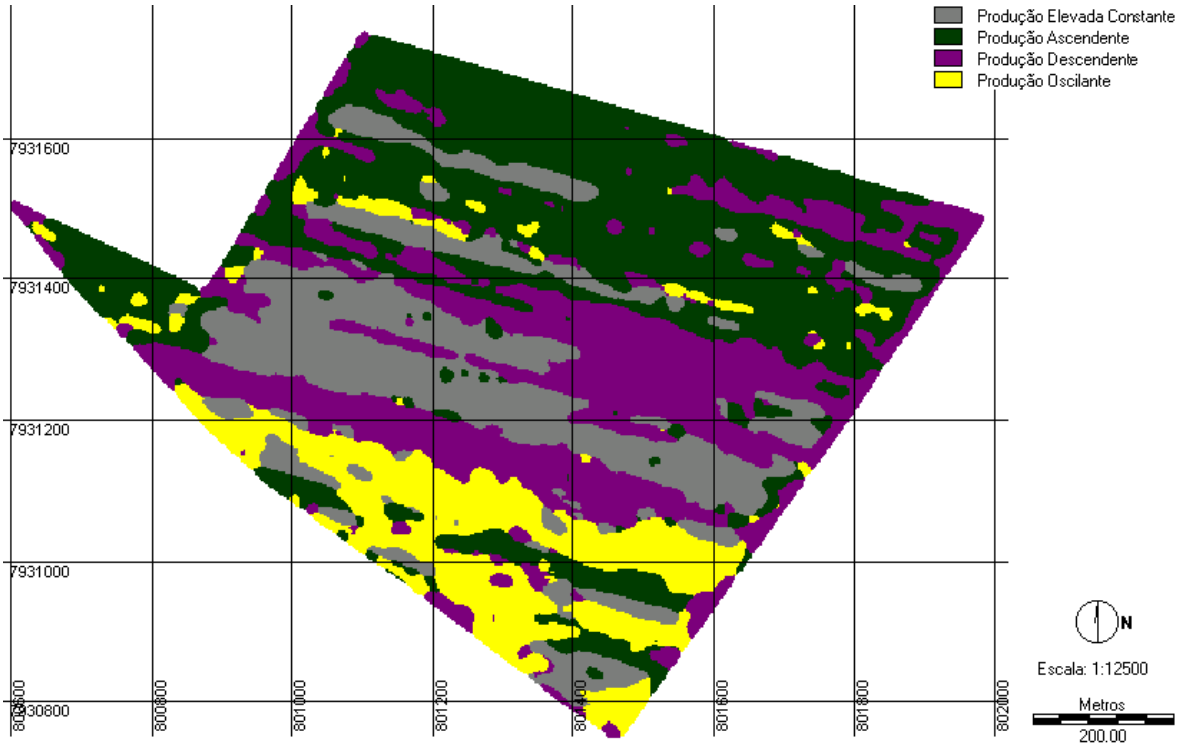


Figura 44. Mapa das classes de comportamento obtidas pelo cruzamento e reclassificação dos mapas de classes de produtividade.

6.2.6 Análise de correspondência entre agrupamentos e classes de comportamento da produtividade de milho e soja.

A tabulação cruzada realizada pelo módulo CROSSTAB do IDRISI representou uma maneira de verificar a correlação espacial entre duas imagens, quando se obtém o número de células de uma determinada classe da primeira imagem, que ocupam a mesma posição em relação a determinada classe da segunda imagem (Quadro 9).

Quadro 9. Taxas de coincidência entre agrupamentos e classes de comportamento da produtividade de milho e soja.

	Classes de Comportamento							
	Prod. Elevada		**Prod. Ascendente**		**Prod. Descendente**		**Prod. Oscilante**	
Agrupamento	**n° de células**	**%**	**n° de células**	**%**	**n° de células**	**%**	**n° de células**	**%**
1	4744	12,0	8742	22,1	24856	**62,7**	1279	3,2
2	4474	20,9	807	3,8	3097	14,5	13010	**60,7**
3	14167	**91,4**	1168	7,5	159	1,0	0	0,0
4	291	0,9	27993	**86,4**	2177	6,7	1933	5,9

Pela análise da associação das duas imagens, observou-se que 62,7% do agrupamento 1 relaciona-se a regiões cujo comportamento da produtividade é descendente; 60,8% do agrupamento 2 relaciona-se a regiões cujo comportamento da produtividade é oscilante; 91,4% do agrupamento 3 relaciona-se a regiões cujo comportamento da produtividade demonstra produtividade mais elevada em todo o período; e 86,4% do agrupamento 4 relaciona-se a regiões cuja classe de comportamento é ascendente. Embora estes resultados identifiquem, ainda que não totalmente, as sub-regiões definidas pelos agrupamentos, eles não fornecem por si só nenhuma indicação para o conhecimento das causas ou fatores que determinaram o comportamento da produtividade nas respectivas sub-regiões. Assim, partindo-se das informações de atributos de solo levantados após a última colheita pode-se buscar alguma indicação de possíveis causas da variação espacial e temporal da produtividade.

6.2.7 Interpolação dos atributos de solo

De forma semelhante ao efetuado com os dados de produtividade, a partir da modelagem da estrutura espacial detectada pela análise geoestatística, efetuou-se a interpolação dos dados de atributos de solo, a qual deu origem aos mapas com a informação dos teores de areia, silte e argila, dos níveis de acidez (pH), de saturação por bases (V%), de

capacidade de troca catiônica (CTC), de soma de bases (SB), bem como dos teores de matéria orgânica (M.O.), de Cálcio (Ca), de Magnésio (Mg) e de Potássio (K) em toda a superfície da área monitorada. Utilizou-se a mesma grade adotada para os dados de produtividade, de modo que fosse possível o cruzamento posterior entre as imagens. Estes atributos tiveram seus valores estimados através da técnica da krigagem ordinária, utilizando-se o modelo ajustado para cada semivariograma. Para os teores de Fósforo (P), que não apresentou dependência espacial para a escala de amostragem utilizada (Figura 23), a estimativa para os pontos não amostrados foi efetuada através de um interpolador que utilizou o critério do inverso do quadrado da distância. Os mapeamentos de cada um dos atributos do solo estão ilustrados nas Figuras 45 a 55.

Devido à necessidade de adoção de um perímetro menor do que o amostrado, motivado pela falha na obtenção de dados de produtividade da última safra, o mapeamento de atributos do solo foi delimitado também por este novo perímetro.

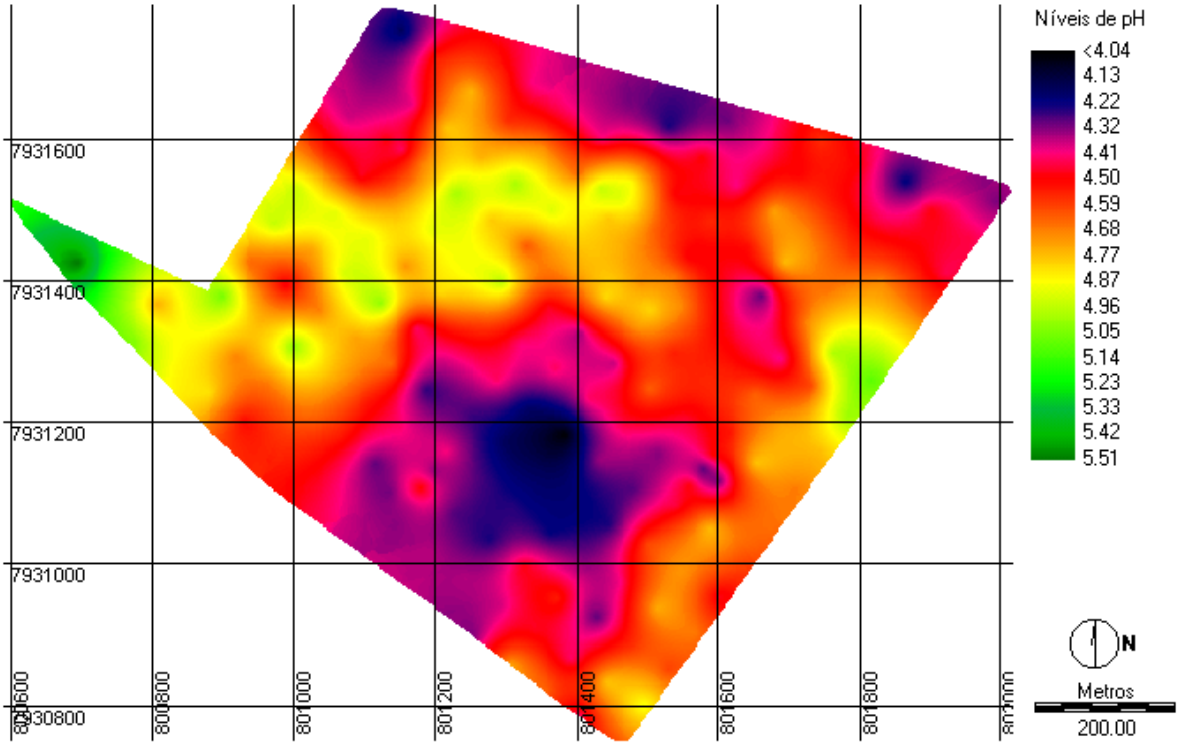


Figura 45. Variabilidade espacial dos níveis de pH do solo (em $CaCl_2$).

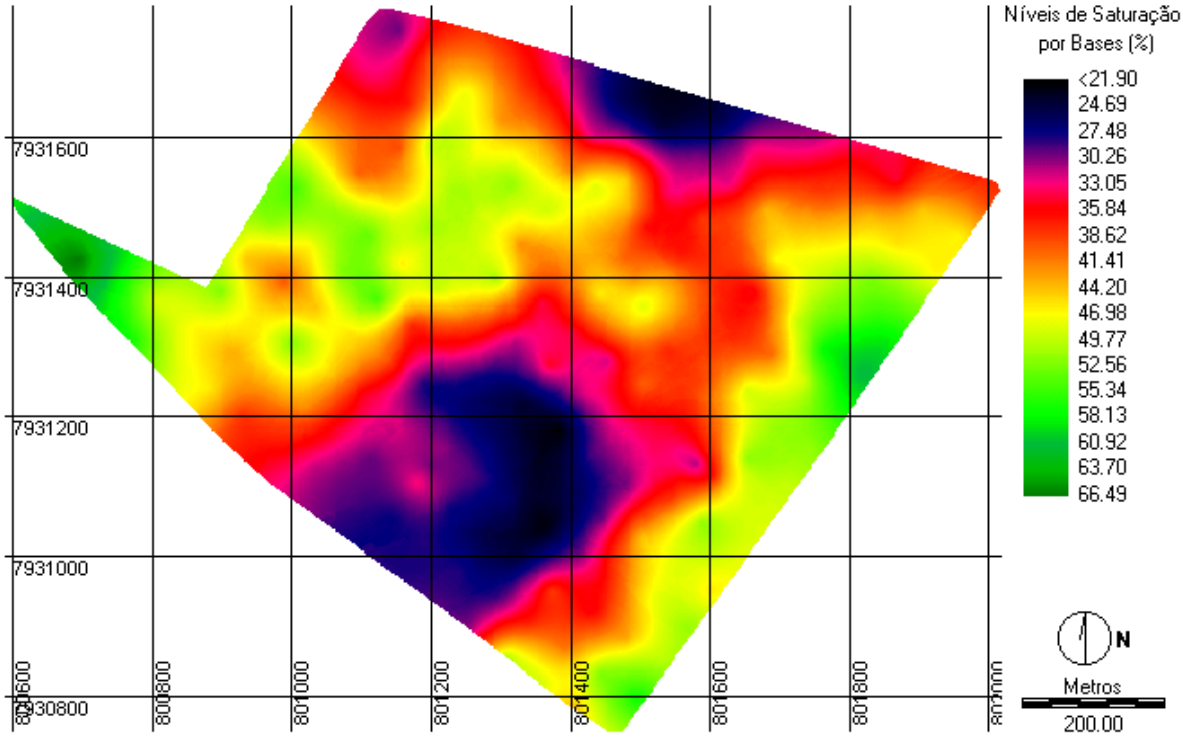


Figura 46. Variabilidade espacial dos níveis de saturação por bases (V%) no solo.

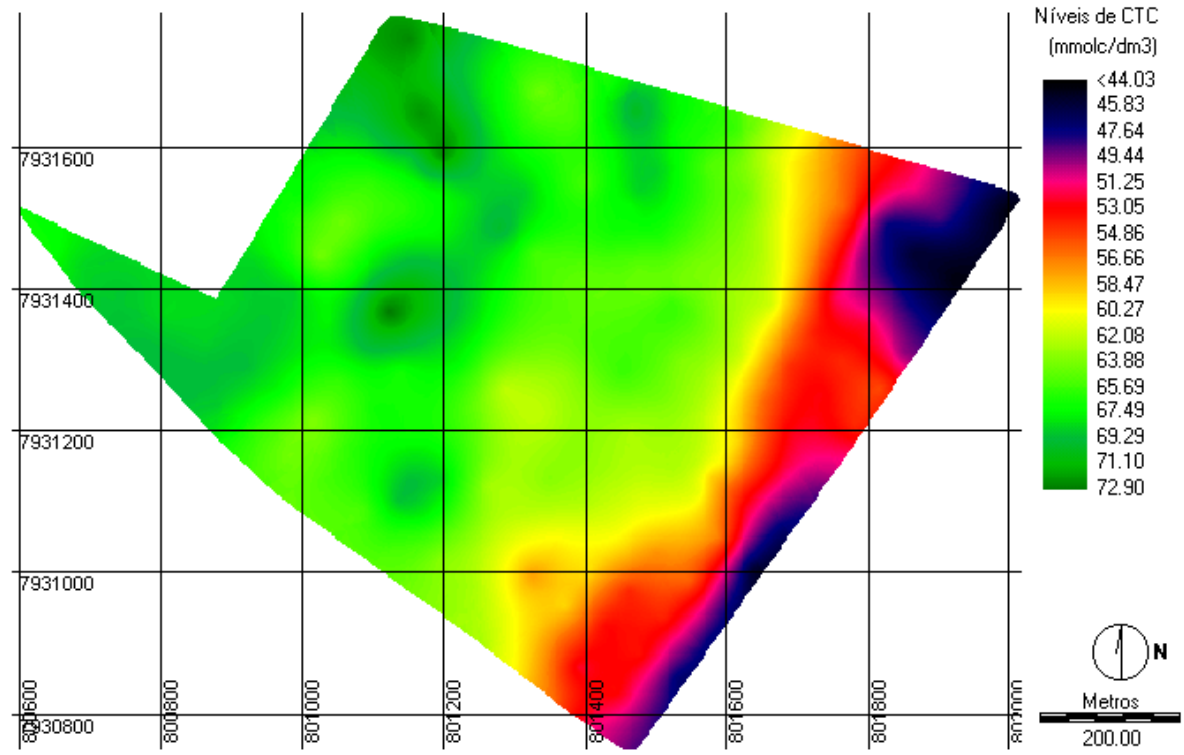


Figura 47. Variabilidade espacial dos níveis de capacidade de troca catiônica (CTC)

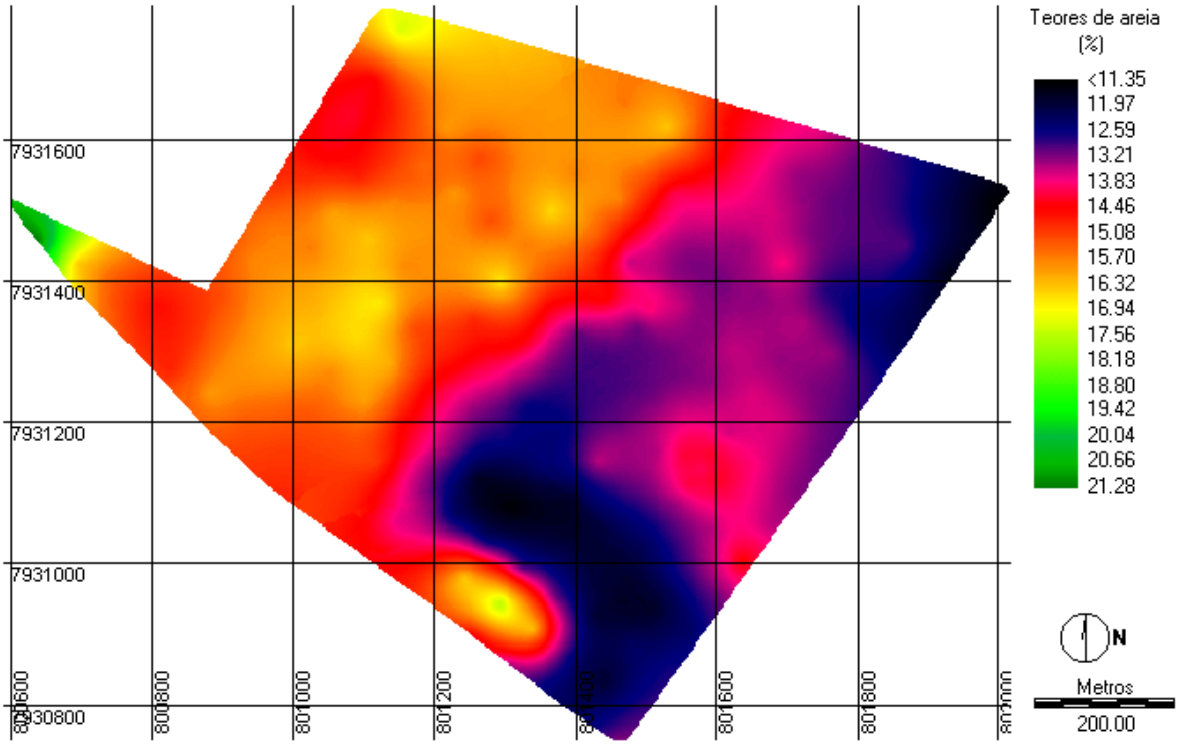


Figura 48. Variabilidade espacial dos teores de areia.

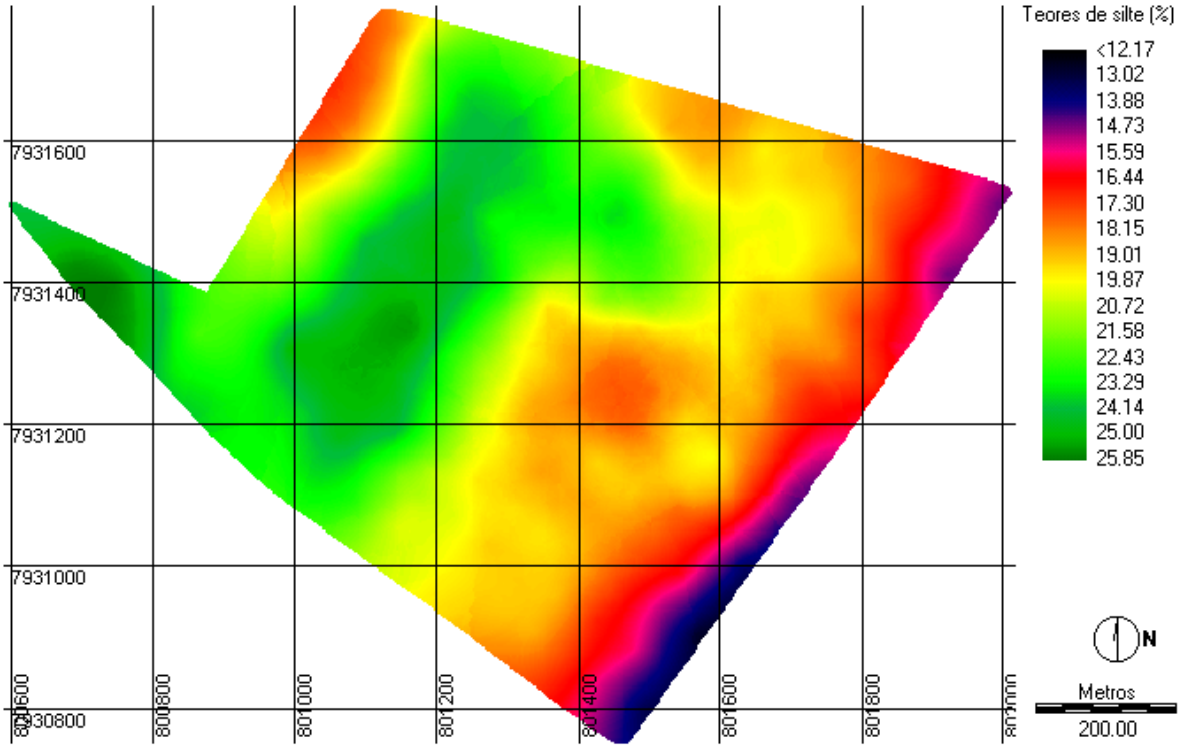


Figura 49. Variabilidade espacial dos teores de silte.

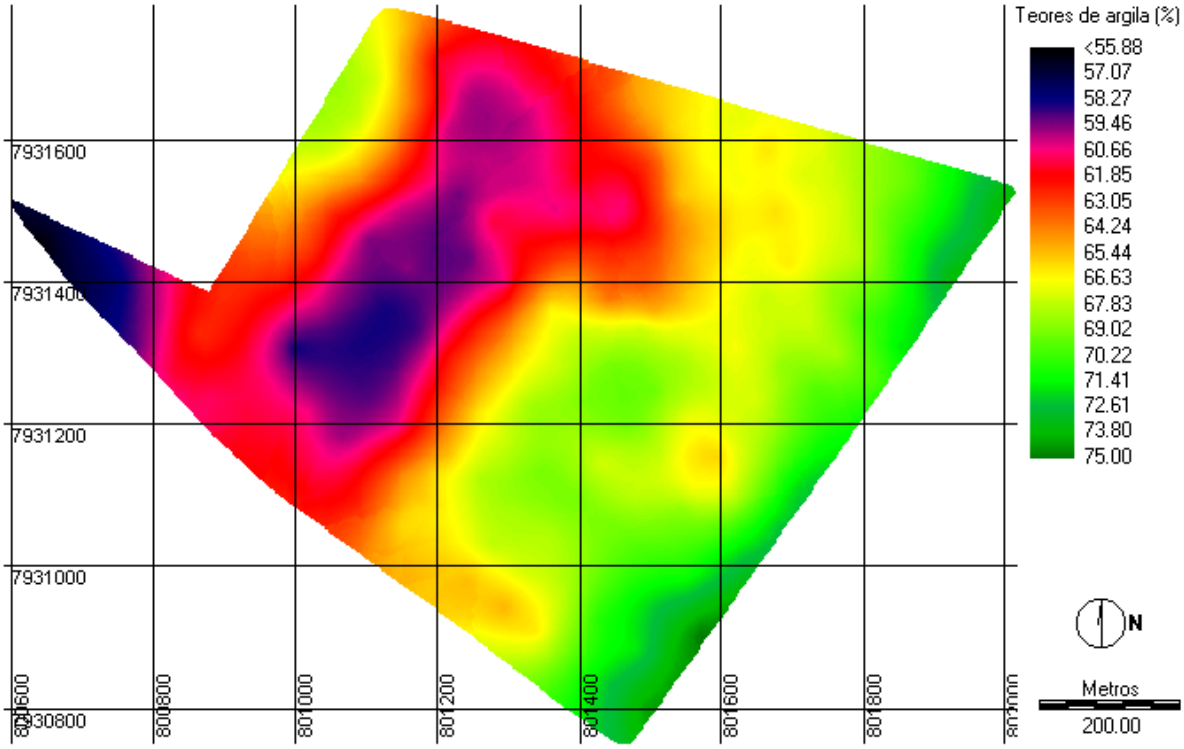


Figura 50. Variabilidade espacial dos teores de argila.

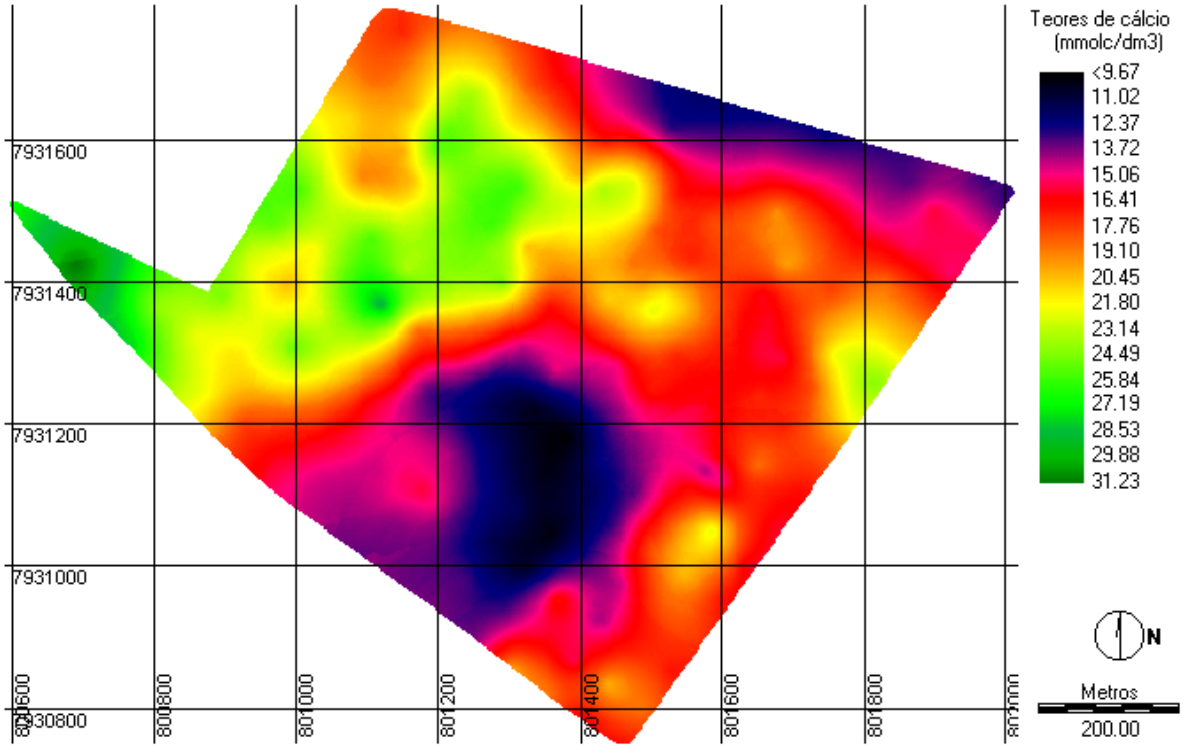


Figura 51. Variabilidade espacial dos teores de Cálcio (Ca).

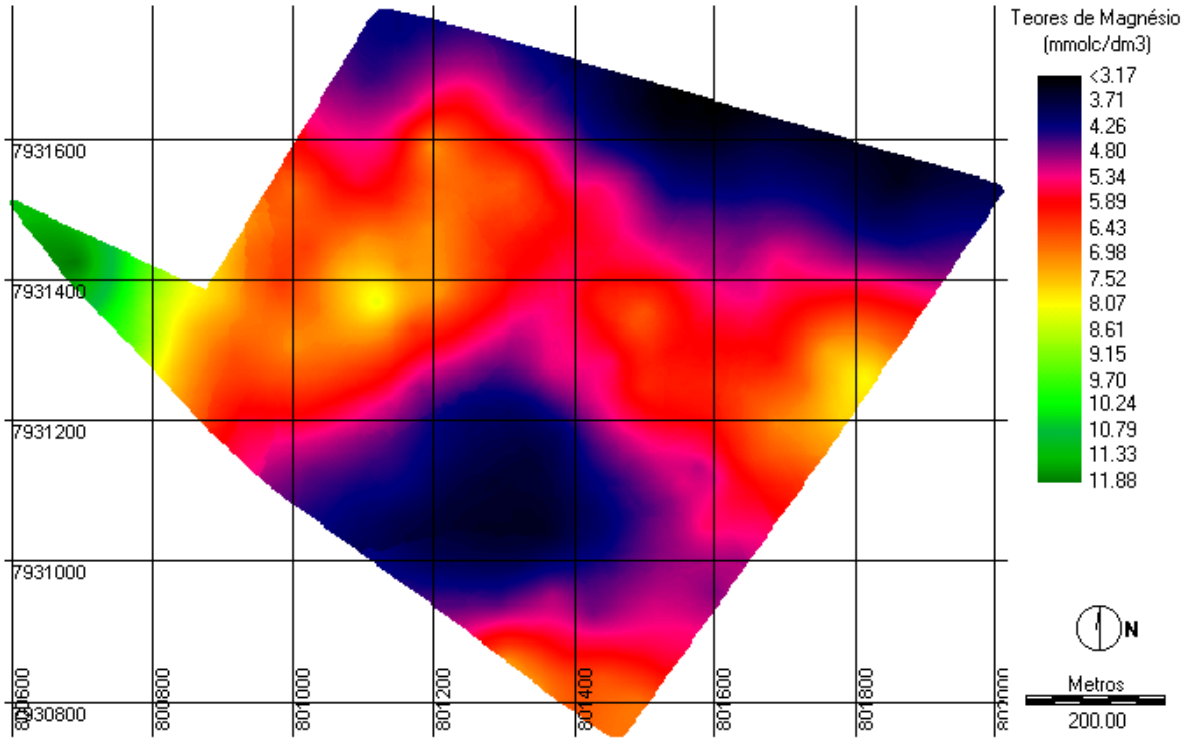


Figura 52. Variabilidade espacial dos teores de Magnésio (Mg).

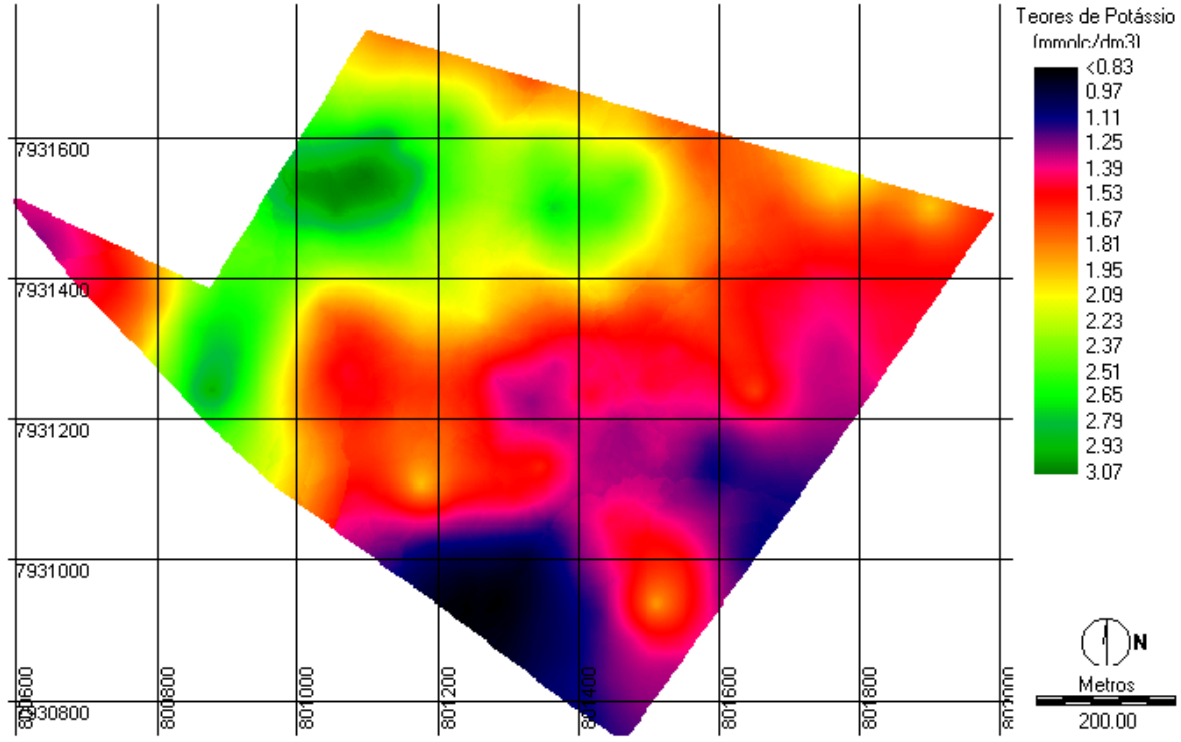


Figura 53. Variabilidade espacial dos teores de Potássio (K).

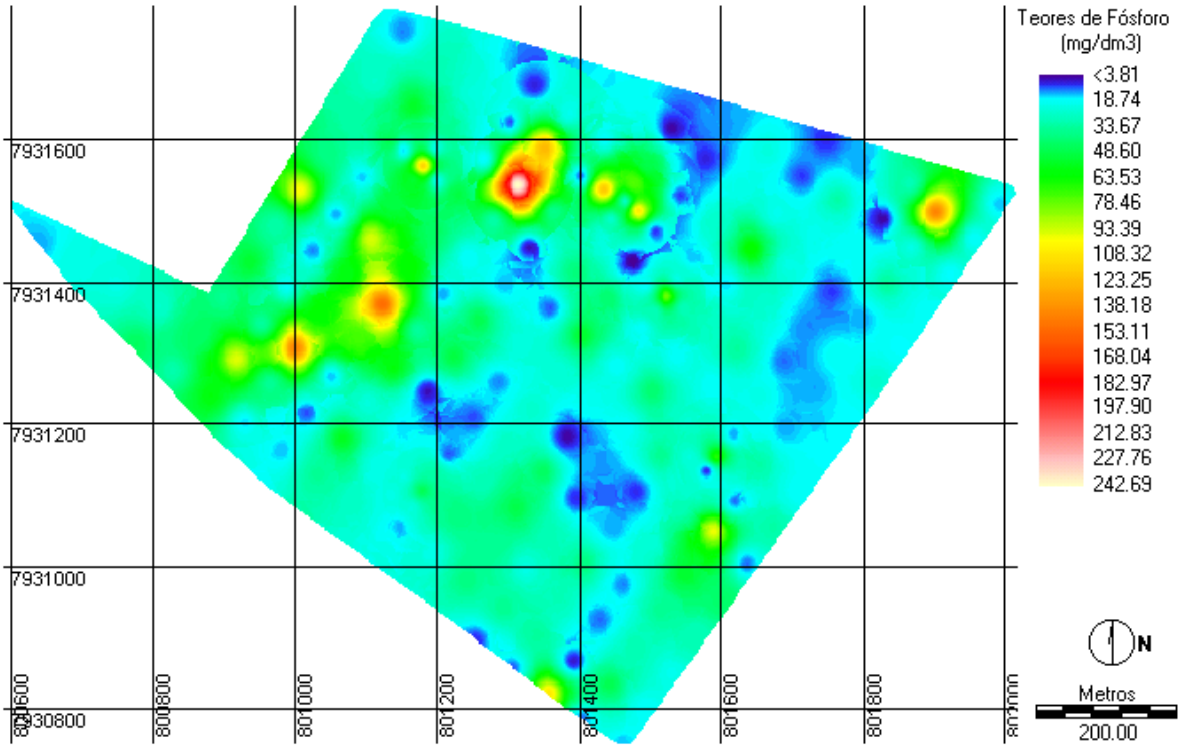


Figura 54. Variabilidade espacial dos teores de Fósforo (P).

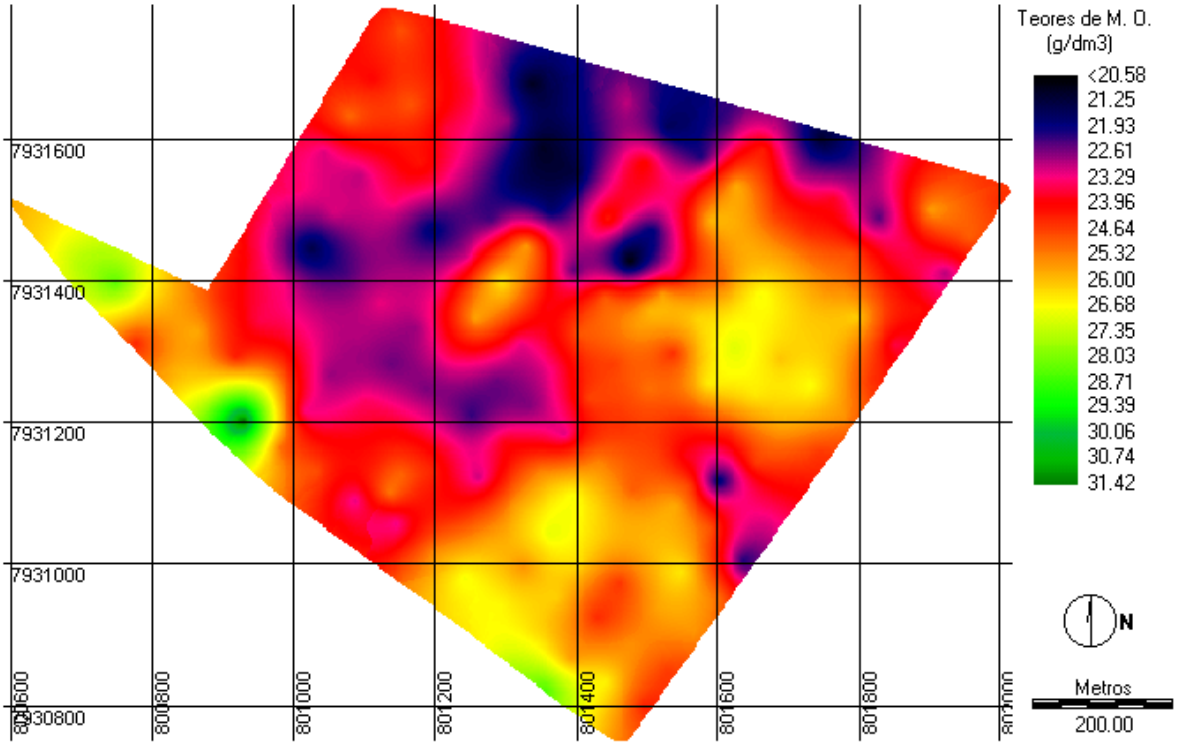


Figura 55. Variabilidade espacial dos teores de matéria orgânica (M.O.).

Uma distinção que pode ser notada, ao se comparar os mapas de produtividade e de atributos do solo, é que nas manchas dos mapas de produtividade predomina um padrão quase horizontal (sentido leste-oeste) na sua disposição dentro da área. Por outro lado, nos mapas de atributos de solo estas manchas, quando não estão dispostas sem um padrão comum, ficaram dispostas preferencialmente no sentido norte-sul (como no caso dos mapas das frações areia, silte e argila do solo). Na verdade, as manchas de produtividade que podem ser observadas já nos mapas com os valores pontuais denotam uma disposição coincidente com o sentido de deslocamento da máquina por ocasião das sucessivas colheitas, como pode ser observado nas Figuras 17 a 19. A interpolação destes dados apenas reforçou esta tendência. Podia-se esperar que alguns dos atributos estudados pudessem apresentar uma tendência de distribuição espacial dos seus valores também no sentido leste-oeste, coincidindo com o arranjo da variação espacial da produtividade, uma vez que o esquema de amostragem exibiu um alinhamento que não se distanciou muito do alinhamento definido pela colhedora. Este fato só ocorreu com os teores de Magnésio, cuja disposição preferencial das manchas ficou próximo daquela exibida também pela produtividade. Entretanto, o que se verificou foi muito mais um acompanhamento do alinhamento transversal do esquema de amostragem na definição das manchas destes atributos, como no caso da argila e da CTC (Figuras 45 a 55).

6.2.8 Classificação dos atributos do solo

No intuito de efetuar cruzamentos com as sub-regiões, os valores presentes nos mapas dos atributos de solo que possuíam uma referência para os critérios de classificação foram objeto de divisão em classes. Para os valores de textura, seguiu-se a definição das classes texturais contidas no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999) A classificação dos atributos químicos de solo seguiu as indicações do Boletim 100 (Van Raij et al., 1996).

As distribuições de Fósforo e Potássio, obtidas por França et al. (1999) numa área irrigada de 40 ha em Sete Lagoas - MG, exibiram padrões semelhantes aos observados neste trabalho. A partir dos mapas classificados, ilustrados nas Figuras 56 a 61, efetuou-se o cruzamento de cada um destes mapas com o mapa das sub-regiões, obtendo-se o nível de correspondência entre eles.

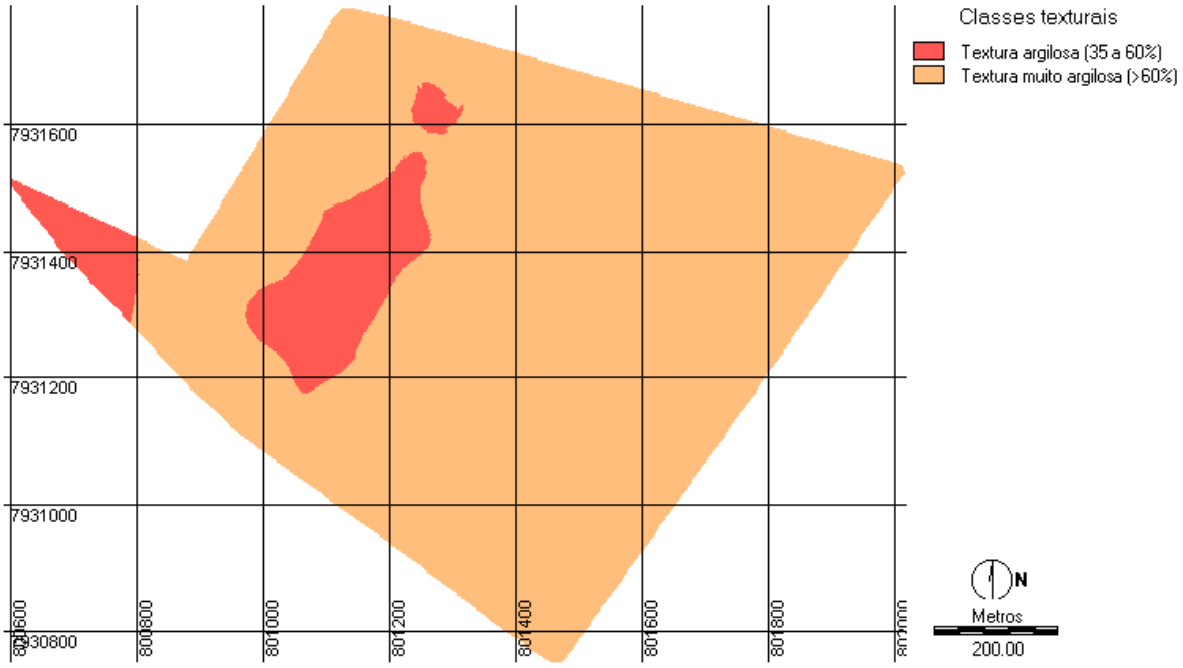


Figura 56. Mapa de classes texturais presentes na área de estudo.

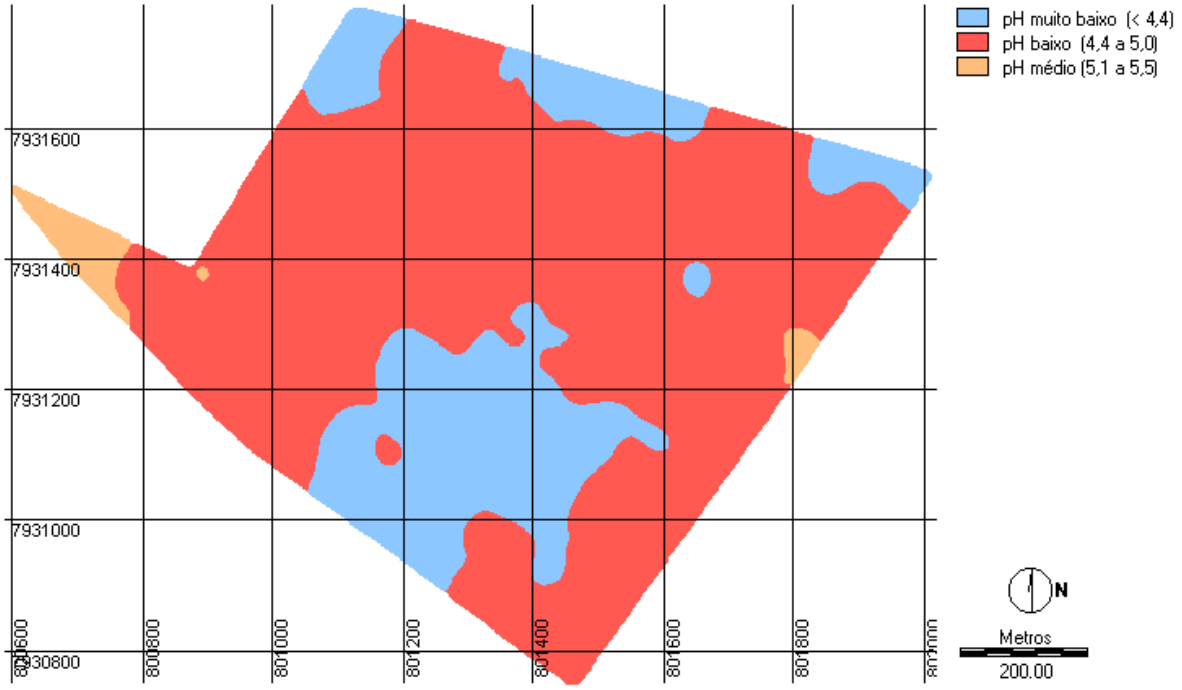


Figura 57. Mapa de classes de acidez do solo (pH) após a última colheita.

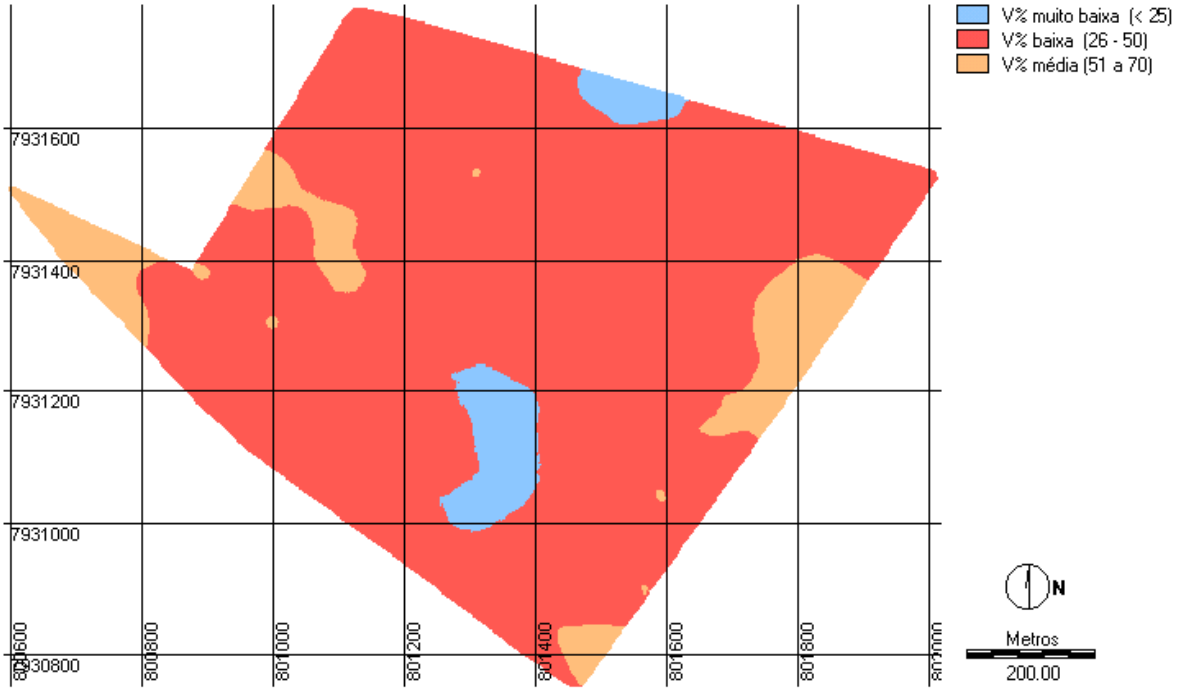


Figura 58. Mapa de classes de saturação por bases (V%) após a última colheita.

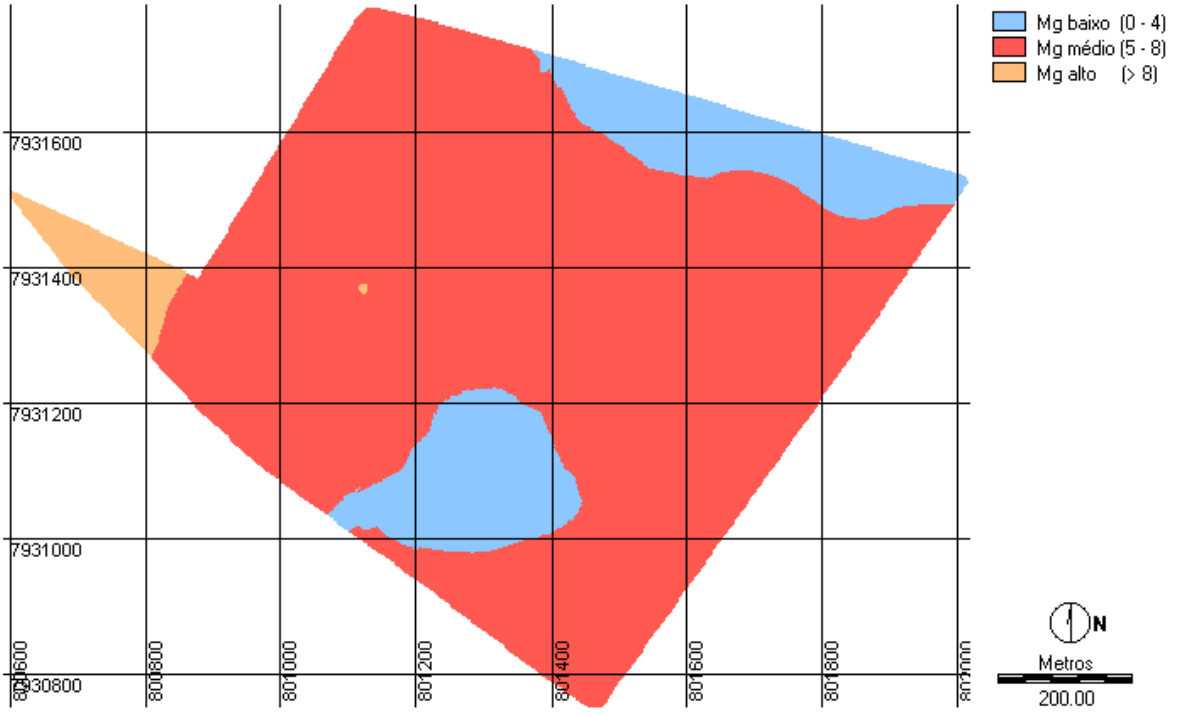


Figura 59. Mapa de classes de Magnésio (Mg) após a última colheita.

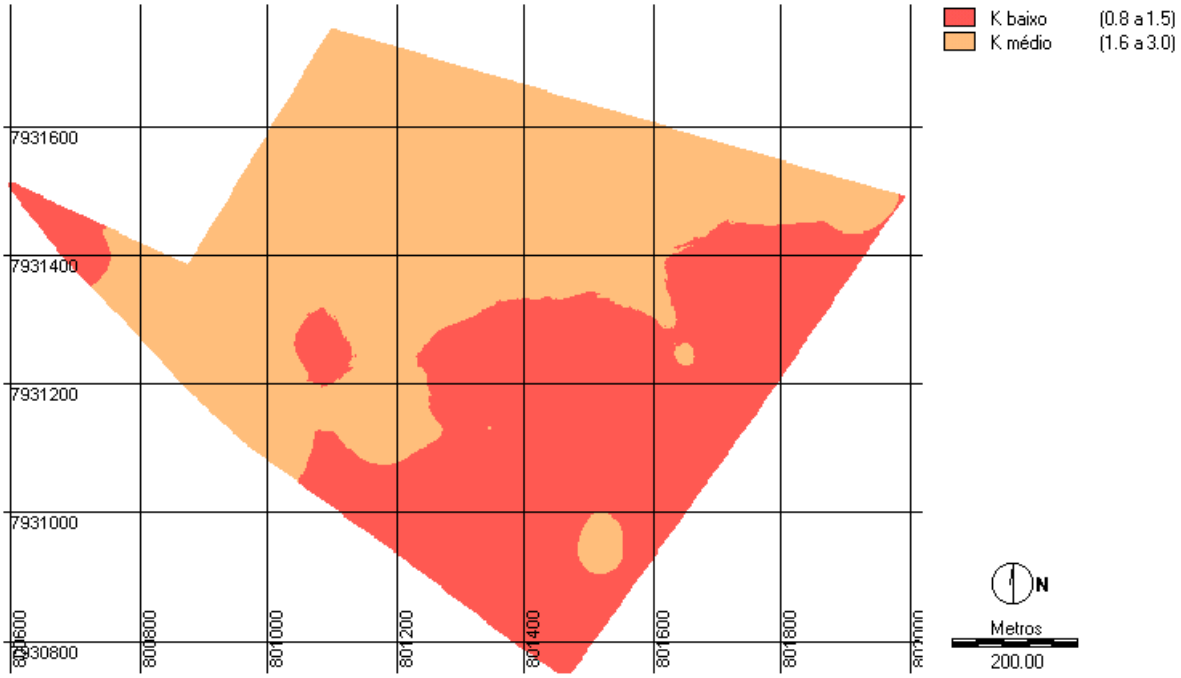


Figura 60. Mapa de classes de Potássio (K) após a última colheita.

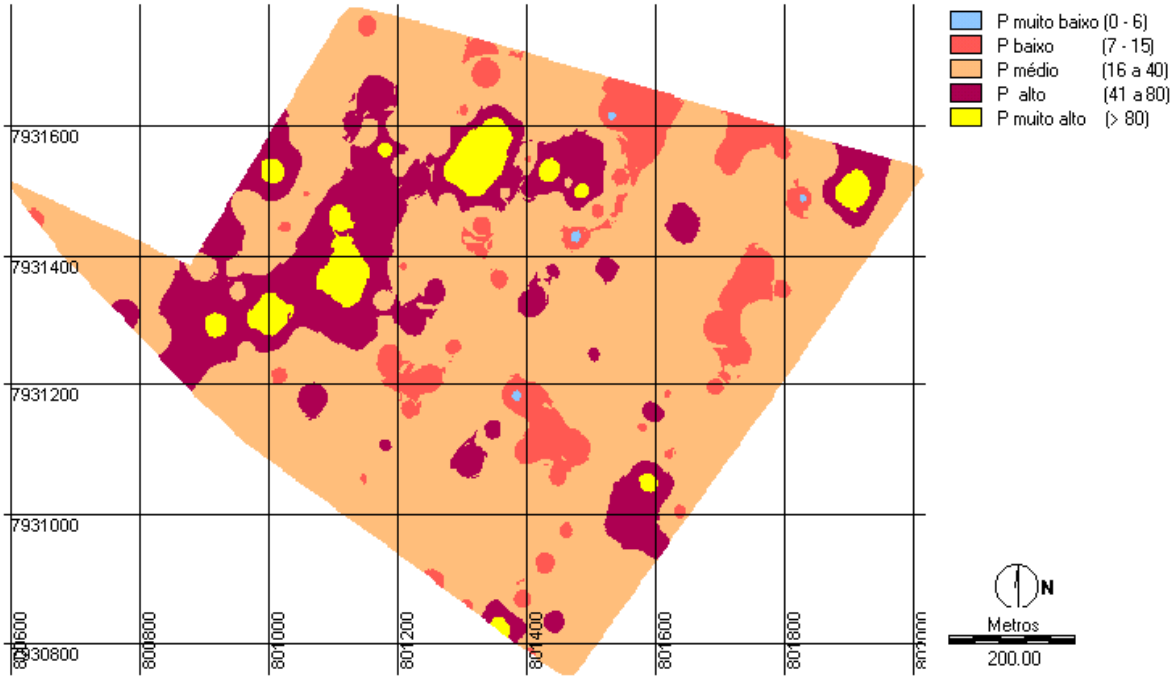


Figura 61. Mapa de classes de Fósforo (P) após a última colheita.

6.2.9 Análise da correspondência entre os agrupamentos da produtividade de milho e soja e as classes de atributos de solo.

Analisando-se isoladamente cada atributo de solo, cuja variabilidade pôde ser classificada em duas ou mais regiões dentro da área, de acordo com os intervalos definidos no Boletim 100 (Van Raij et al., 1996), observou-se que, conforme listado no Quadro 10, para todos os atributos analisados, ao se efetuar o cruzamento com o mapa de agrupamentos, uma única classe englobou a maior parte de cada um dos agrupamentos, exceto para o Potássio, quando as duas únicas classes detectadas dividiram proporcionalmente a presença de cada agrupamento. Ou seja, para uma mesma classe do atributo de solo, a produtividade exibiu comportamentos distintos em diferentes partes da área, revelando uma fraca taxa de coincidência da distribuição espacial do atributo analisado em relação à distribuição espacial das sub-regiões definidas pelos agrupamentos. Se esta taxa de coincidência fosse forte, o atributo analisado poderia ser sugerido como um dos fatores que influenciaram algum dos comportamentos da produtividade no período estudado.

Quadro 10. Taxas de coincidência entre agrupamentos e classes de atributos de solo [(a)].

		Agrupamento			
Atributo	**Classe**	**1**	**2**	**3**	**4**
Fósforo	Muito baixo	0,0	0,1	0,0	0,2
	Baixo	7,5	3,9	6,9	9,0
	Médio	**73,1**	**78,3**	**53,4**	**72,6**
	Alto	16,9	17,1	27,8	14,7
	Muito alto	2,5	0,6	11,9	3,4
Magnésio	Baixo	7,0	22,6	4,2	14,8
	Médio	**91,2**	**75,8**	**95,6**	**77,5**
	Alto	1,8	1,5	0,2	7,6
Acidez (pH)	Muito baixo	16,3	38,2	23,2	15,7
	Baixo	**81,7**	**61,3**	**76,8**	**78,9**
	Médio	2,0	0,5	0,0	5,4
Potássio	Baixo	51,2	60,4	40,2	25,5
	Médio	48,8	39,6	59,8	74,5
Saturação por bases (V%)	Muito baixa	3,0	7,2	6,0	1,5
	baixa	**84,0**	**86,9**	**86,8**	**87,4**
	média	13,0	5,9	7,2	11,0
Textura	Argilosa	11,3	4,2	22,1	9,5
	Muito argilosa	**88,7**	**95,8**	**77,9**	**90,5**

[(a)] em %.

Deve ser salientado, entretanto, que os dados dos atributos do solo foram obtidos após a última colheita, não havendo meios de se resgatar informações georreferenciadas destes atributos para todo o período antecedente ao intervalo de produção estudado. Essa é uma das razões que tornam compreensível o fato de não se ter verificado nenhuma relação entre a fertilidade do solo, ou a distribuição espacial da textura do solo posteriormente ao desenvolvimento das culturas, e a variação da produtividade observada nas três safras estudadas. Provavelmente os níveis de nutrientes e algumas condições de cultivo não mantiveram os mesmos padrões durante todo o período de desenvolvimento das culturas e variaram espacialmente de um ano para outro, quando os níveis de precipitação pluviométrica foram instáveis. A capacidade de retenção de água e o teor de água disponível para as plantas são propriedades do solo que poderiam ter relação com a textura do solo, bem como com o modo que esta textura varia espacialmente na área. Uma variação na distribuição espacial da disponibilidade de água para as plantas tenderia a influenciar na variabilidade espacial da produtividade. Esta possibilidade é refletida nos resultados obtidos por Stafford et al. (1996), nos quais a análise de influência do tipo de solo na variação da produtividade sugeriu que a propriedade física do solo mais provável de exercer influência na produtividade é a distribuição do tamanho das partículas, que exerce um papel principal na determinação da água disponível para as plantas.

A ausência de correlação entre a variação de atributos do solo e a variação na produtividade, como as obtidas para os dados analisados neste trabalho, tem sido exibida com freqüência em trabalhos correlatos. Atestando esta afirmativa, Shatar & McBratney (1999), trabalhando também com dados coletados após a colheita, confirmaram que a verdadeira relação entre Fósforo do solo e a produtividade de sorgo pode não ser identificável. Os autores usaram dados de produtividade de um único ano para identificar estas relações com vários atributos de solo e somente uma pequena fração da variação observada na produtividade pôde ser explicada por qualquer um dos fatores estudados. Stafford et al. (1996), analogamente, investigaram a relação entre a variação dos teores de nutrientes do solo e a variação na produtividade de um determinado ano, sem que fossem detectadas dependências significativas. Blackmore et al. (1999) também não encontraram evidência de qualquer nutriente de solo ou pH oriundos de levantamento em malha como fator limitante para o desenvolvimento da cultura. Em contrapartida, Mulla & Bhatti (1997) dividiram um

campo em zonas de baixa, média e alta produtividade, as quais relacionaram-se com propriedades do solo, especialmente pH, matéria orgânica e teor de água disponível no solo. É importante salientar que um único mapeamento da produtividade foi considerado, e que os autores acreditam que por ser uma região de condição de cultivo com deficiência hídrica, os locais de baixa produtividade no campo podem exibir um padrão persistente de um ano para outro. Ainda conforme Mulla & Bhatti (1997), geralmente as sub-regiões delimitadas por classes de produtividade associaram-se a diferentes posições no relevo. Além disso, teores mais reduzidos de Fósforo foram associados com áreas de menor produtividade, que por sua vez localizavam-se em porções do terreno mais atingidas por processos erosivos, enquanto nas áreas de produtividade média e elevada não se verificaram diferenças significativas. Resultados similares foram obtidos por Li et al. (2001), os quais verificaram menores produtividade de algodão e menor absorção de Nitrogênio em posições mais elevadas da paisagem, onde os solos exibiram maior suscetibilidade de perda de água e nutrientes por erosão eólica.

Na área objeto deste estudo, porém, não foi possível determinar nenhuma associação com diferentes posições no relevo, uma vez que a área apresentou superfície bastante plana. Desta forma, praticamente não ocorrem os processos de transporte e sedimentação de partículas que poderiam caracterizar a redução ou elevação da concentração de nutrientes em determinadas porções da área e, eventualmente, interferir no comportamento da produtividade. A variação detectada para os teores de Fósforo, assim como para os outros nutrientes aplicados ao solo, provavelmente seja resultado da contribuição da própria natureza do material de origem do solo e, principalmente, em virtude do sucessivo processo de adição de fertilizantes e corretivos, que mesmo partindo de doses constantes, não deixa de apresentar variações na aplicação ou no próprio material aplicado.

Quando se estudam dados de vários anos, aparentemente torna-se mais difícil estabelecer essas relações. Wendroth et al. (2001), por exemplo, também não encontraram associação espacial entre mapas de produtividade de grãos de três safras, mapas de índice de vegetação e mapas de índice de solo (que incluem diversos atributos de solo). A análise integrada dos atributos de solo e da produtividade, entretanto, poderia revelar algumas interações entre dois ou mais atributos, as quais poderiam eventualmente influir no comportamento da produtividade e exibir alguma relação com as sub-regiões encontradas.

Ainda assim, é possível que as interações detectadas para o conjunto de dados de um único ano não mantivessem a mesma intensidade e as mesmas posições para os anos posteriores. Além disso, outros fatores não levantados, como compactação, capacidade de retenção de água, temperatura, entre outros, podem ser listados como agentes no processo de desenvolvimento das culturas, cujas relações mútuas também teriam de ser consideradas para averiguar as possíveis limitações ou estímulos que definiram temporal e espacialmente o comportamento da produtividade.

6.3 Influência da precipitação pluviométrica e da aplicação localizada de fertilizantes

O mapa de produtividade de milho do primeiro ano analisado (1998) exibiu uma região de produtividade acentuadamente baixa na porção norte e nordeste da área, bem como no extremo oeste (Figura 17). Inversamente, no ano seguinte, o mapa de produtividade de soja exibiu níveis de produtividade inferior na porção sul da área, embora mantivesse uma pequena área de baixa produtividade também na parte nordeste (Figura 18). Por sua vez, o mapa de produtividade do milho da colheita de 2000 apresentou, na área como um todo, uma aparente uniformidade no nível de produtividade (Figura 19).

A precipitação pluviométrica ocorrida durante o ano de 1997 (1702 mm) superou em 26% a média histórica da região (1350 mm), ao mesmo tempo em que correspondeu ao dobro da precipitação pluviométrica ocorrida no ano seguinte (845 mm). Considerando-se a condição do relevo praticamente plano, provavelmente tenha havido um acúmulo de água em algumas partes da área no primeiro ano, ao passo que no ano seguinte, com apenas metade da precipitação pluviométrica ocorrida no ano anterior, parte da área pode ter sofrido uma restrição hídrica suficiente para limitar o nível de produtividade nesses locais. A localização das manchas de produtividade abaixo da média mais concentrada em lados opostos da área, justamente nos dois anos em que a precipitação pluviométrica foi mais contrastante, sugeriu a possibilidade de que a porção mais ao norte apresente algum impedimento à drenagem adequada, e conseqüentemente, zonas de alagamento temporário ocorram quando precipitações mais elevadas são registradas, enquanto a porção mais ao sul não esteja submetida ao mesmo nível de impedimento à infiltração, por apresentar menores barreiras à drenagem ou por estar numa posição levemente mais elevada em relação ao lado oposto, não permitindo o acúmulo superficial. Por outro lado, quando a precipitação

pluviométrica ficou bem abaixo da média, a cultura de soja pode ter sido submetida a uma menor disponibilidade de água no solo na porção sul (Figuras 41 e 42).

Em virtude do solo do presente trabalho ser extremamente argiloso, sua microestrutura do solo permite alta capacidade de infiltração e alta retenção de água. A microporosidade, porém, pode reter a água numa condição de pressão que não a disponibilize com facilidade para a cultura, tornando menos eficientes os processos de absorção de água e nutrientes pelas plantas. Este estudo não contemplou a investigação da macro e microporosidade do solo, não permitindo a confirmação desta hipótese.

Ainda que se tenha constatado a variabilidade espacial da textura do solo, a orientação da sua distribuição na área não ajudou a explicar o fenômeno da inversão das áreas de produtividade inferior com a expressiva alteração dos níveis de precipitação pluviométrica, uma vez que enquanto as manchas de baixa produtividade alternaram-se no sentido norte-sul, a variação da textura ocorreu distintamente no sentido leste-oeste (Figuras 44 e 50).

A maior uniformidade da produtividade na última safra de milho (Figura 19) coincidiu com um nível de precipitação pluviométrica (1231 mm) que ficou bem próximo da média histórica da precipitação pluviométrica anual (1350 mm). Na eventualidade das condições expostas anteriormente serem acertadas, este nível de precipitação pluviométrica, de um modo geral, pode ter sido adequado para o desenvolvimento da cultura, sem a caracterização de áreas com encharcamento ou deficiência hídrica limitando a produtividade. Entretanto, essa aparente uniformidade pode ter outras razões, como o fato de ter sido semeado um único híbrido (Cargil 929), em contrapartida aos três materiais utilizados no primeiro ano (híbridos Cargil 333, 806 e 702). Outro fator a considerar é uma possível contribuição para a uniformidade dada pela aplicação localizada de adubos após o primeiro e o segundo ano, embora o levantamento da fertilidade após a última safra tenha revelado bastante heterogeneidade nos teores de nutrientes remanescentes, indicando que a próxima aplicação de insumos permitiria novamente um manejo de fertilizantes a taxas variáveis.

7. CONCLUSÕES

Ao estudar-se os dados de produtividade das culturas e de atributos do solo, concluiu-se que:

i) os dados de produtividade expressaram uma dependência espacial bastante consistente, abrangendo uma faixa de correlação com distâncias entre 30 e 40 metros;

ii) o grau de variabilidade espacial expresso pelo índice de contribuição da semivariância estrutural (%C) abrangeu um nível de variabilidade alta para a safra de milho em 1998 e variabilidade média para as safras de soja em 1999 e milho em 2000;

iii) a técnica de análise de agrupamentos, aplicada ao conjunto dos três mapas de produtividade, possibilitou a divisão da área em quatro sub-regiões;

iv) a combinação dos mapas, classificados por nível de produtividade, permitiu definir quatro classes de comportamento da produtividade expressivamente relacionados às sub-regiões obtidas;

v) nenhum dos atributos estudados do solo correspondeu isoladamente a um fator limitante ou estimulante à produção em qualquer das sub-regiões;

vi) quando a precipitação pluviométrica anual foi bem acima e bem abaixo da média histórica, a ocorrência de baixa produtividade em lados opostos da área não foi explicada pela distribuição espacial da textura do solo;

vii) a definição de zonas de manejo, a partir das sub-regiões, requer ainda um levantamento de outras variáveis, em especial as que dizem respeito à oferta de água disponível às plantas e à infiltração de água no solo; e,

viii) técnicas de análise multivariada devem ser conduzidas sobre um número maior de atributos para tentar-se encontrar indicações dos fatores de produção que determinem a presença de sub-regiões com comportamentos diferenciados da produtividade.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS[3]:

ASSAD, M. L. L. Uso de um sistema de informações geográficas na determinação da aptidão agrícola de terras. *R. Bras. Ci. Solo*, v.19, p.133-9, 1995.

BLACKMORE, S. The interpretation of trends from multiple yield maps. *Comput. Electron. Agr*., v.26, p.37-51, 2000.

BLACKMORE, S, GODWIN, R. J., TAYLOR, J. C., COSSER, N. D., WOOD, G. A., EARL, R., KNIGHT, S. Understanding variability in four fields in the United Kngdom. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.3-18.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. *Projeto Radambrasil* - Programa de Integração Nacional - Levantamento de Recursos Naturais. v.31. 1983. 764p.

BRAUM, S. M., HINDS, P., MALZER, G. L., BELL, J. MULLA, D. ROBERT, P. C. Terrain attributes and soil nitrogen: spatial effects on corn yields responses to nitrogen fertilization for a Northern, Glaciated landscape. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON

[3] De acordo com as Normas para Elaboração de Dissertações e Teses da Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP/Botucatu, vigentes a partir de 1° de janeiro de 1998.

PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.195-201.

BROOS, B. MISSOTTEN, B. REYBROUCK, S. De BAERDEMAEKER, J. Mapping and interpretation of sugar yield differences. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.171-81

BURROUGH, P. A. *Principles of geographical information systems for land resource assessment.* New York, Oxford University Press, 1986. 531p.

BURROUGH, P. A., McMILLAN, R. A., DEURSEN, W. P. A. Fuzzy classification methods for determining land suitability from soil profile observations and topography. *J. Soil Sci.*, v.43, p.193-210, 1992.

CLAY, D. E., CARLSON, C. G., CHANG, J., CLAY, S. A., MALO, D. D. Systematic evaluation of precision farming soil sampling requirements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.253-65.

COELHO, A. M., DORAN, J. W., SCHEPERS, J. S. Irrigated corn yield as related to spatial variability of selected soil properties. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.441-52.

COOK, S. E. ADAMS, M. L., CORNER, R. J. On-farm experimentation to determine site-specific response to variable inputs. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.611-21.

COX, S. M., WARDLAW, M. C. Grid soil sampling to determine manageable physical and chemical properties affecting soybean production. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.327-33.

CREUTIN, J. D., OBLED, C. Objective analysis and mapping techniques for rainfalls fields: an objective comparison. *Water Resource Res.*, v.18, p.413-31, 1982.

DAMPNEY, P. M. R., MOORE, M. Precision agriculture in England: Current practice and research-based advice to farmers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.661-73.

DAVIS, B. M. Uses and abuses of cross-validation in geostatistics. *Math. Geol.*, v.19, p.241-8, 1987.

DOERGE, T. A., GARDNER, D. L. On-farming testing using the adjacent strip comparison method. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.603-9.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Manual de métodos de análise de solo*. 2ª ed. Rio de Janeiro, CNPS/EMBRAPA, 1997. 212p.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Rio de Janeiro: CNPS,1999. 412p.

EASTMAN, J. R. *IDRISI32 – Guide to GIS and image processing*. Massachusettes, Clark University, v.2, 1999. 169p.

FERGUSON, R. B., HERGERT, G. W., SCHEPERS, J. S., CRAWFORD, C. A. Site-specific nitrogen management of irrigated corn. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.733-43.

FIETZ, C. R., FABRICIO, A. C., SALTON, J. C. Mapa de aplicação localizada de calcário em uma área experimental. In: BALASTREIRE, L. A. (ed). *O estado-da-arte da agricultura de precisão no Brasil*. Piracicaba: L. A. Balastreire, 2000. p.165-9.

FORMAGGIO, A. R.; ALVES, S. D. & EPIPHANIO, J. C. N. Sistemas de informações geográficas na obtenção de mapas de aptidão agrícola e de taxa de adequação de uso das terras. *R. Bras. Ci. Solo*, v.16, p.249-56, 1992.

FRANÇA, G. E., OLIVEIRA, A. C., MANTOVANI, E. C., ANDRADE, C. L. T., MARRIEL, I. E. Análise preliminar de mapas de variabilidade da fertilidade de solo. In: BORÉM, A. et al. (ed.). *Agricultura de precisão*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2000. p.339-56.

FRAISSE, C. W., SUDDUTH, K. A., KITCHEN, N. R. evaluation of crop models to simulate site-specific crop development and yield. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part B, p.1297-308.

GONÇALVES, A. C. A., FOLEGATTI, M. V., VIEIRA, S. R. Padrões de amostragem e intensidade de krigagem na caracterização do armazenamento de água no solo, em área irrigada por pivô central. *R. Bras. Ci. Solo*, v.23, p.485-95, 1999.

GOOVAERTS, P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, v.89, p.1-45, 1999.

GAMMA DESIGN SOFTWARE. GS+. Geostatistical for de Environmental Science. Versão 5.0.3, 2000.

HEINIGER, R. W., DUMPHY, E. J. Selection and application of cultivars to different sites within a field. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.641-52.

HOPKINS, J. W., SHNITKEY, G. D., MIRANDA, M. J., TWEEETEN, L. G. Learning from yield monitors: A Bayesian approach. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.183-93.

IRVIN, B. J., VENTURA, S. J., SLATER, B. K. Fussy and isodata classification of landforme elements from digital terrain data in Pleasant Valley, Wisconssin. *Geoderma,* v.77, p.137-54, 1997.

ISAAKS, E. H., SRIVASTAVA, R. M. *An introduction to applied geoestatistics*. New York, Oxford University Press. 1989. 560p.

JOHANNSEN, C. J., CARTER, P. G., WILLIS, P. R. et al. Applying remote sensing Technology to precision farming. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part B, p.1413-22.

JOHNSON, R. M., BRADOW, J. M., BAUER, P. J., SADLER, E. J. Spatial variability of cotton fiber yield and quality in relation to soil variability. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.487-97.

KARLEN, D. L., ANDREWS, S. S., COLVIN, T. S., JAYNES, D. B. Spatial and temporal variability in corn growth, development, insect pressure, and yield. In: INTERNATIONAL

CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.101-12.

KHAKURAL, B. R., ROBERT, P. C., HUGGINS, D. R. Variability of corn/soybean yield and soil/landscape properties across a southwestern Minnesota Landscape. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.573-9.

KRAVCHENKO, A. N., BULLOCK, D. G. Comparison of interpolation methods for mapping soil P and K contents. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.267-79.

KUHAR, J.E.(ed) *The precision-farming guide for agriculturists*. Moline, 1997. 117p.

LAMPARELLI, R. A. C., ROCHA, J. V. Agricultura de precisão: maior produtividade e menor custo. *Agrosoft (on-line)*, n. 1, p.1-6, 1997. Disponível em: /http://www.agrosoft.com.br/revista/. Acesso em 10-10-2000.

LARK, R. M., STAFFORD, J. V. Classification as a first step in the interpretation of temporal and spatial variation of crop yield. *Ann. Appl. Biol*. n. 130, P. 111-21, 1997.

LARK, R. M., STAFFORD, J. V., BOLAN, H.C. Limitations on the spatial resolution of yield mapping for combinable crops. *J. Agric. Eng. Res*. n. 66, P. 183-93, 1997a.

LARK, R. M., STAFFORD, J. V., FROMENT, M.A. Exploratory analysis of yield maps of combinable crops. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 1, 1997. Warwick. *Proceedings*... Oxford: BIOS Scientific Publishers, 1997b. p.887-94.

LARK, R. M., BOLAN, H.C., MAYR, T., BRADLEY, R.I., BURTON, R.G.O., DAMPNEY, P.M.R. Analysis of yield maps in support of field investigation of soil variation. In:

EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 2, 1999. Odense. *Proceedings*... Silsoe, Sheffield, 1999. p.151-62.

LASLET, G. M., MCBRATNEY, A. B. PAHL, P. HUTCHINSON, M. Comparison of several spatial prediction methods for soil pH. *J. Soil Sci.*, v.38, p.325-41, 1987.

LEGG, B.J., STAFFORD, J.V. Precision agriculture – new tecnologies. In: BRIGHTON CROP PROTECTION CONFERENCE: PESTS & DISEASES, 1998. Brighton. *Proceedings*... Brighton: British Crop Protection Council, 1998. p.1143-50.

LI, H. LASCANO, R. J., BOOKER, J., WILSON, L. T., BRONSON, K. F. Cotton lint yield variability in a heterogeneous soil at a landscape scale. *Soil Till. Res.*, v.58, p.245-58, 2001.

LIBARDI, P. L., MANFRON, P.A., MORAES, S. O., TUON, R. L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. *R. Bras. Ci. Solo*, v.20, p.1-12, 1996.

LÜTTICKEN, R. E. Implementation of precision fertilizing concepts on practical farms in Western Germany. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.859-67.

MARQUES JÚNIOR, J., CORÁ, J. E. Atributos do solo para agricultura de precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas, Anais... Lavras: Suprema. 1998, p.31-70.

MARQUES JÚNIOR, J., SANCHEZ, R. B., PEREIRA, G. T., CORÁ, J. E. Variabilidade espacial de propriedades químicas e físicas de latossolos em áreas de cerrado sob cultivo de café, em Patrocínio, MG. In: BALASTREIRE, L. A. (ed). *O estado-da-arte da agricultura de precisão no Brasil*. Piracicaba: L. A. Balastreire, 2000. p.105-12.

McBRATNEY, A. B., MOORE, A. W. Application of fuzzy sets to climate classification. *Agr. For. Meteorol.* v.35, p.165-85, 1985.

MOLIN, J. P. Geração e interpretação de mapas de produtividade para agricultura de precisão. In: BORÉM, A. et al. (ed.). *Agricultura de precisão*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2000. p.237-57.

MULLA, D. J., BHATTI, A. U. An evaluation of indicator properties affecting spatial patterns in N and P requirements for winter wheat yield. In: Stafford, J. V. (ed.), PRECISION AGRICULTURE 97, EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 1, 1997. Warwick. *Proceedings*... Oxford: BIOS Scientific Publishers, 1997. p.145-53. 1997

NIELSEN, D. R. WENDROTH, O., PIERCE, F. J. Emerging concepts for solving the enigma of precision farming research. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.303-18.

NOLIN, M. C. SIMARD, R. R., CAMBOURIS, A. N., BEAUCHEMIN, S. Specific variability of phosphorus status and sorption characteristics in clay soils of the St. Lawrence Lowlands (Quebec). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.395-406.

OLIVER, M.A. Exploring soil spatial variation geostatistically. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 2, 1999. Odense. *Proceedings*... Silsoe: Sheffield, 1999. p.03-18.

PIERCE, F. J., NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. *Adv. Agron.*, v.67, p.1-85, 1999.

RUNGE, E. C. A., HONS, F. M. Precision agriculture – development of a hierarchy of variables influencing crop yields. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON

PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.143-58.

SELLES, F., CAMPBELL, C. A., McCONKEY, B. G., MESSER, D., BRANDT, S.A. Spatial distribution of soil nitrogen supplying power: a tool for precision farming. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.407-15.

SHATAR, M. T., MCBRATNEY, A. B. Empirical modeling of relationships between sorghum Yield and soil properties. *Precision Agriculture,* Kluwer Academic Publisers, v.1, p.249-76, 1999.

SIMMELSGAARD, S. E., DJURHUUS, J. The possibilities of precision fertilization with N, P and K based on plant and soil parameters. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 1, 1997. Warwick. *Proceedings*... Oxford: BIOS Scientific Publishers, 1997. p.179-87.

SOARES, S. M. GPS na cartografia: uma ferramenta para o geoprocessamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas. Anais... Lavras: Suprema, 1998. p.01-57.

STAFFORD, J. V., AMBLER, B., LARK, R. M., CATT, J. mapping and interpreting yield variation in cereal crops. *Comput. Electron. Agr*., v.14, p.101-19, 1996.

STAFFORD, J. V., AMBLER, B., BOLAM, H. C. Cut width sensors to improve the accuracy of yield mapping systems. In EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 1, 1997. Warwick. *Proceedings*... Oxford: BIOS Scientific Publishers, 1997. p.519-28

STAFFORD, J. V., LARK, R. M., BOLAM, H. C. Using yield maps to regionalize fields into potential management units. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION

AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.225-37.

TABIOS, G. Q., SALAS, J. D. A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *Water Resour. Bull.*, v.21, p.365-80, 1985.

TIMLIN, D. J., PACHEPSKI, Y. A., SNYDER, V. A., BRYANT, R. B., Soil surface curvature and the spatial and temporal variability of corn grain yields on a hillslope. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.203-14.

TRANGMAR, B. B., YOST, R. S., UEHARA, G. Aplication of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv. Agron.*, v.38, p.45-94, 1985.

Van RAIJ, B., CANTARELLA, H., QUAGGIO, J. A., FURLANI, A. M. C. *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo (Boletim n. 100)*. 2.ed. Campinas, Instituto Agronômico & Fundação IAC, 1996. 285p.

Van RAIJ, B., QUAGGIO, J. A. *Métodos de análise de solo para fins de fertilidade*. Boletim técnico n. 81. Campinas: IAC, 1983. 39p.

VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. In: BORÉM, A. et al. (ed.). *Agricultura de precisão*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2000. p.93-108.

VOLTZ, M., WEBSTER, R. A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information. *J. Soil Sci.*, v.41, p.451-72, 1990.

WARRICK, A. W., ZHANG, R., HARRIS, M. K., MYERS, D. E. Direct comparisons between kriging and other interpolation - Validation of flow and transport models for the unsaturated zone. New Mexico, 1988. P.254-326.

WENDROTH, O., JÜRCHIIK, P., KERSEBAUN, K. C., REUTER, H., van KESSEL, C., NIELSEN, D. R. Identifying, understanding, and describing spatial processes in agricultural landscapes - four case studies. *Soil Till. Res.*, v.58, p.113-27, 2001.

WILLIS, P. R., CARTER, P. G., JOHANNSEN, C. J. Assessing yield parameters by remote sensing techniques. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.1465-73.

ZHANG, M., HENDLEY, P., DROST, D., O'NEIL M., USTIN, S. Corn and soybean yield indicators using remotely sensed vegetation index. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings*... Madison: American Society of Agronomy, 1999. Part A, p.1475-81.

ZIMBACK, C. R. L., CATANEO, A., RODRIGUES, J. B. T. Interpolação de características físicas de solos por krigagem ordinária e correlações. In: LATINOAMERICANO DE INGENHARIA RURAL, 1, 1998. Argentina, *Anais*... Argentina: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. CDRom.

9. ANEXOS

Anexo I. Exemplos de seqüências de pontos com coordenadas [(a)] repetidas:

800896.78	7931418.55	4.24	800946.73	7931406.34	7.52	801230.13	7931329.03	10.29	801501.89	7931263.42	1.22	801609.22	7930970.56	5.89
800896.78	7931418.55	4.68	800946.73	7931406.34	9.27	801230.13	7931329.03	10.27	801501.89	7931263.42	1.25	801609.22	7930970.56	5.63
800896.78	7931418.55	6.00	800946.73	7931406.34	11.09	801230.13	7931329.03	10.13	801501.89	7931263.42	0.30	801609.22	7930970.56	6.61
800896.78	7931418.55	7.05	800946.73	7931406.34	11.18	801230.13	7931329.03	10.46	801501.89	7931263.42	0.00	801609.22	7930970.56	6.48
800896.78	7931418.55	9.21	800946.73	7931406.34	10.07	801230.13	7931329.03	11.45	801501.89	7931263.42	0.00	801609.22	7930970.56	6.43
800896.78	7931418.55	10.07	800946.73	7931406.34	7.41	801230.13	7931329.03	11.33	801501.89	7931263.42	0.00	801609.22	7930970.56	6.29
800896.78	7931418.55	10.23	800946.73	7931406.34	0.63	801230.13	7931329.03	11.57	801501.89	7931263.42	1.34	801609.22	7930970.56	6.73
800896.78	7931418.55	10.87	800946.73	7931406.34	0.00	801230.13	7931329.03	11.45	801501.89	7931263.42	0.39	801609.22	7930970.56	6.65
800896.78	7931418.55	10.78	800946.73	7931406.34	0.28	801230.13	7931329.03	10.80	801501.89	7931263.42	0.00	801609.22	7930970.56	6.57
800896.78	7931418.55	10.32	800946.73	7931406.34	2.68	801230.13	7931329.03	10.51	801501.89	7931263.42	2.72	801609.22	7930970.56	6.51
800896.78	7931418.55	11.07	800946.73	7931406.34	4.07	801230.13	7931329.03	10.89	801501.89	7931263.42	4.07	801609.22	7930970.56	5.81
800896.78	7931418.55	10.52	800946.73	7931406.34	4.80	801230.13	7931329.03	11.91	801501.89	7931263.42	5.11	801609.22	7930970.56	7.19
800896.78	7931418.55	11.78	800946.73	7931406.34	4.49	801230.13	7931329.03	12.92	801501.89	7931263.42	7.10	801609.22	7930970.56	6.66
800896.78	7931418.55	11.41	800946.73	7931406.34	6.42	801230.13	7931329.03	10.27	801501.89	7931263.42	8.24	801609.22	7930970.56	6.42
800896.78	7931418.55	11.71	800946.73	7931406.34	7.39	801230.13	7931329.03	8.81	801501.89	7931263.42	7.53	801609.22	7930970.56	6.50
800896.78	7931418.55	11.51	800946.73	7931406.34	8.25	801230.13	7931329.03	10.89	801501.89	7931263.42	6.95	801609.22	7930970.56	7.31
800896.78	7931418.55	12.01	800946.73	7931406.34	9.29	801230.13	7931329.03	3.61	801501.89	7931263.42	8.02	801609.22	7930970.56	6.96
800896.78	7931418.55	12.28	800946.73	7931406.34	10.13	801230.13	7931329.03	4.38	801501.89	7931263.42	9.52	801609.22	7930970.56	5.26
800896.78	7931418.55	10.95	800946.73	7931406.34	10.30	801230.13	7931329.03	6.76	801501.89	7931263.42	9.48	801609.22	7930970.56	5.49
800896.78	7931418.55	11.63	800946.73	7931406.34	10.81	801230.13	7931329.03	8.12	801501.89	7931263.42	8.88	801609.22	7930970.56	4.35
800896.78	7931418.55	11.80	800946.73	7931406.34	11.35	801230.13	7931329.03	10.58	801501.89	7931263.42	9.14	801609.22	7930970.56	3.26
800896.78	7931418.55	11.56	800946.73	7931406.34	11.10	801230.13	7931329.03	11.87	801501.89	7931263.42	10.07	801609.22	7930970.56	3.62
800896.78	7931418.55	12.42	800946.73	7931406.34	10.47	801230.13	7931329.03	12.26	801501.89	7931263.42	11.78	801609.22	7930970.56	4.15
800896.78	7931418.55	11.03	800946.73	7931406.34	11.35	801230.13	7931329.03	12.03	801501.89	7931263.42	11.64	801609.22	7930970.56	4.74
800896.78	7931418.55	9.91	800946.73	7931406.34	11.68	801230.13	7931329.03	12.36	801501.89	7931263.42	12.26	801609.22	7930970.56	4.30
800896.78	7931418.55	11.25	800946.73	7931406.34	11.18	801230.13	7931329.03	12.67	801501.89	7931263.42	12.19	801609.22	7930970.56	5.21
800896.78	7931418.55	11.24	800946.73	7931406.34	9.82	801230.13	7931329.03	12.45	801501.89	7931263.42	12.15	801609.22	7930970.56	5.82
800896.78	7931418.55	11.62	800946.73	7931406.34	10.14	801230.13	7931329.03	12.77	801501.89	7931263.42	12.49	801609.22	7930970.56	7.06
800896.78	7931418.55	11.53	800946.73	7931406.34	10.90	801230.13	7931329.03	11.50	801501.89	7931263.42	12.81	801609.22	7930970.56	6.64
800896.78	7931418.55	12.17	800946.73	7931406.34	11.43	801230.13	7931329.03	11.45	801501.89	7931263.42	12.17	801609.22	7930970.56	5.52
800896.78	7931418.55	11.74				801230.13	7931329.03	11.87	801501.89	7931263.42	12.34	801609.22	7930970.56	4.07
800896.78	7931418.55	11.25	801501.89	7931263.42	1.22	801230.13	7931329.03	11.93	801501.89	7931263.42	12.40	801609.22	7930970.56	5.18
800896.78	7931418.55	11.75	801501.89	7931263.42	1.25	801230.13	7931329.03	12.41	801501.89	7931263.42	12.32	801609.22	7930970.56	5.60
800896.78	7931418.55	11.13	801501.89	7931263.42	0.3	801230.13	7931329.03	13.36	801501.89	7931263.42	12.76	801609.22	7930970.56	5.69
800896.78	7931418.55	11.72	801501.89	7931263.42	0	801230.13	7931329.03	13.48	801501.89	7931263.42	12.94	801609.22	7930970.56	5.34
800896.78	7931418.55	10.61	801501.89	7931263.42	0	801230.13	7931329.03	9.96	801501.89	7931263.42	12.78	801609.22	7930970.56	5.28
800896.78	7931418.55	10.73	801501.89	7931263.42	0	801230.13	7931329.03	12.31	801501.89	7931263.42	13.25	801609.22	7930970.56	6.11
800896.78	7931418.55	10.81	801501.89	7931263.42	1.34	801230.13	7931329.03	9.68	801501.89	7931263.42	12.76	801609.22	7930970.56	5.72
800896.78	7931418.55	10.66	801501.89	7931263.42	0.39	801230.13	7931329.03	1.55	801501.89	7931263.42	12.97	801609.22	7930970.56	5.62
800896.78	7931418.55	11.21	801501.89	7931263.42	0	801230.13	7931329.03	0.00	801501.89	7931263.42	13.42	801609.22	7930970.56	4.79
800896.78	7931418.55	11.49	801501.89	7931263.42	2.72	801230.13	7931329.03	5.52	801501.89	7931263.42	11.55	801609.22	7930970.56	5.57
800896.78	7931418.55	11.70	801501.89	7931263.42	4.07	801230.13	7931329.03	6.49	801501.89	7931263.42	12.25	801609.22	7930970.56	5.77
800896.78	7931418.55	12.27	801501.89	7931263.42	5.11				801501.89	7931263.42	12.52	801609.22	7930970.56	6.23
800896.78	7931418.55	11.29	801501.89	7931263.42	7.1	801631.00	7931196.77	13.03	801501.89	7931263.42	6.43	801609.22	7930970.56	6.33
800896.78	7931418.55	11.24	801501.89	7931263.42	8.24	801631.00	7931196.77	12.78				801609.22	7930970.56	5.98
800896.78	7931418.55	10.26	801501.89	7931263.42	7.53	801631.00	7931196.77	12.50	801634.76	7930989.87	3.70	801609.22	7930970.56	5.95
800896.78	7931418.55	11.24	801501.89	7931263.42	6.95	801631.00	7931196.77	13.23	801634.76	7930989.87	3.74	801609.22	7930970.56	5.44
800896.78	7931418.55	10.22	801501.89	7931263.42	8.02	801631.00	7931196.77	13.02	801634.76	7930989.87	3.78	801609.22	7930970.56	5.06
800896.78	7931418.55	10.67	801501.89	7931263.42	9.52	801631.00	7931196.77	12.59	801634.76	7930989.87	3.71	801609.22	7930970.56	5.62
800896.78	7931418.55	10.36	801501.89	7931263.42	9.48	801631.00	7931196.77	12.43	801634.76	7930989.87	3.88	801609.22	7930970.56	6.10
800896.78	7931418.55	10.85	801501.89	7931263.42	8.88	801631.00	7931196.77	13.37	801634.76	7930989.87	3.66	801609.22	7930970.56	5.66
800896.78	7931418.55	11.25	801501.89	7931263.42	9.14	801631.00	7931196.77	12.35	801634.76	7930989.87	3.54	801609.22	7930970.56	5.28
800896.78	7931418.55	10.60	801501.89	7931263.42	10.07	801631.00	7931196.77	11.80	801634.76	7930989.87	3.78	801609.22	7930970.56	5.76
800896.78	7931418.55	10.46	801501.89	7931263.42	11.78	801631.00	7931196.77	11.54	801634.76	7930989.87	3.56	801609.22	7930970.56	6.07
800896.78	7931418.55	11.06	801501.89	7931263.42	11.64	801631.00	7931196.77	8.68	801634.76	7930989.87	3.37	801609.22	7930970.56	5.63
800896.78	7931418.55	11.69	801501.89	7931263.42	12.26	801631.00	7931196.77	2.39	801634.76	7930989.87	3.85	801609.22	7930970.56	4.96
800896.78	7931418.55	11.98	801501.89	7931263.42	12.19	801631.00	7931196.77	6.91	801634.76	7930989.87	3.15	801609.22	7930970.56	5.17
800896.78	7931418.55	11.66	801501.89	7931263.42	12.15	801631.00	7931196.77	9.19	801634.76	7930989.87	3.17	801609.22	7930970.56	3.44
800896.78	7931418.55	12.22	801501.89	7931263.42	12.49	801631.00	7931196.77	9.23	801634.76	7930989.87	3.02	801609.22	7930970.56	0.34
800896.78	7931418.55	12.06	801501.89	7931263.42	12.81	801631.00	7931196.77	9.64	801634.76	7930989.87	3.47	801609.22	7930970.56	6.35
800896.78	7931418.55	11.77	801501.89	7931263.42	12.17	801631.00	7931196.77	9.87	801634.76	7930989.87	4.03	801609.22	7930970.56	6.63
800896.78	7931418.55	11.11	801501.89	7931263.42	12.34	801631.00	7931196.77	11.29	801634.76	7930989.87	2.73	801609.22	7930970.56	8.50
800896.78	7931418.55	12.12	801501.89	7931263.42	12.4	801631.00	7931196.77	11.34	801634.76	7930989.87	1.73			
800896.78	7931418.55	12.48	801501.89	7931263.42	12.32	801631.00	7931196.77	10.37	801634.76	7930989.87	2.69			
800896.78	7931418.55	11.94	801501.89	7931263.42	12.76	801631.00	7931196.77	11.53	801634.76	7930989.87	3.43	801283.84	7931307.01	11.29
800896.78	7931418.55	11.65	801501.89	7931263.42	12.94	801631.00	7931196.77	11.89	801634.76	7930989.87	3.32	801283.84	7931307.01	9.95
800896.78	7931418.55	11.71	801501.89	7931263.42	12.78	801631.00	7931196.77	11.71	801634.76	7930989.87	0.56	801283.84	7931307.01	11.74
800896.78	7931418.55	11.24	801501.89	7931263.42	13.25	801631.00	7931196.77	10.64	801634.76	7930989.87	0.00	801283.84	7931307.01	13.25
800896.78	7931418.55	11.21	801501.89	7931263.42	12.76	801631.00	7931196.77	10.85	801634.76	7930989.87	0.10	801283.84	7931307.01	12.76
800896.78	7931418.55	11.68	801501.89	7931263.42	12.97	801631.00	7931196.77	10.91	801634.76	7930989.87	1.74	801283.84	7931307.01	5.66
800896.78	7931418.55	12.01	801501.89	7931263.42	13.42	801631.00	7931196.77	11.21	801634.76	7930989.87	0.00	801283.84	7931307.01	7.67
800896.78	7931418.55	11.12	801501.89	7931263.42	11.55	801631.00	7931196.77	11.67	801634.76	7930989.87	2.86	801283.84	7931307.01	7.77
800896.78	7931418.55	11.15	801501.89	7931263.42	12.25	801631.00	7931196.77	11.81	801634.76	7930989.87	0.10	801283.84	7931307.01	3.36
800896.78	7931418.55	9.63	801501.89	7931263.42	12.52	801631.00	7931196.77	12.84	801634.76	7930989.87	3.40			

[(a)] Para cada grupo, na primeira coluna estão listados os valores de longitude, na segunda coluna aparecem os valores de latitude e finalmente, na terceira coluna, os respectivos valores de produtividade.

Anexo II. Quadro de classificação do comportamento da produtividade

Classe de produtividade em 1998	Classe de produtividade em 1999	Classe de produtividade em 2000	Código da nova classe [a]
baixa	baixa	baixa	3
média	baixa	baixa	3
alta	baixa	baixa	3
baixa	média	baixa	3
média	média	baixa	3
alta	média	baixa	3
baixa	alta	baixa	3
média	alta	baixa	3
alta	alta	baixa	3
baixa	baixa	média	2
média	baixa	média	4
alta	baixa	média	4
baixa	média	média	2
média	média	média	2
alta	média	média	3
baixa	alta	média	2
média	alta	média	2
alta	alta	média	1
baixa	baixa	alta	2
média	baixa	alta	4
alta	baixa	alta	4
baixa	média	alta	2
média	média	alta	2
alta	média	alta	1
baixa	alta	alta	2
média	alta	alta	2
alta	alta	alta	1

(a) A classe de comportamento 1 corresponde a produtividade elevada constante; a classe de comportamento 2 corresponde a produtividade ascendente (inclui produtividade estagnada em torno da média); a classe de comportamento 3 corresponde a produtividade descendente (inclui produtividade estagnada abaixo da média); e, a classe de comportamento 4 corresponde a produtividade oscilante.