**VARIABILIDADE DE ATRIBUTOS DE SOLO
E DE *Crotalaria juncea* L. EM SOLO
DEGRADADO DO MUNICÍPIO
DE PIRACICABA-SP**

ADEODATO ARI CAVALCANTE SALVIANO

Engenheiro Agrônomo

Orientador: PqC Dr. **SIDNEY ROSA VIEIRA**

Tese apresentada à Escola Superior
de Agricultura "Luiz de Queiroz",
Universidade de São Paulo, para a
obtenção do título de Doutor em
Agronomia, Área de Concentração:
Solos e Nutrição de Plantas.

PIRACICABA

Estado de São Paulo - Brasil

Dezembro - 1996

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - Campus "Luiz de Queiroz"/USP

Salviano, Adeodato Ari Cavalcante

Variabilidade de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* L. em solo degradado do município de Piracicaba-SP / Adeodato Ari Cavalcante Salviano. - - Piracicaba, 1996.

91p. : il.

Tese (doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1996.
Bibliografia

1. Cânhamo-da-india - Produtividade - Piracicaba, SP 2. Geostatística 3. Solo - Degradação - Piracicaba, SP 4. Solo - Erosão - Piracicaba, SP 5. Solo - Propriedade - Variabilidade espacial I. Título

CDD 631.45
633.562

**VARIABILIDADE DE ATRIBUTOS DE SOLO
E DE *Crotalaria juncea* L. EM SOLO
DEGRADADO DO MUNICÍPIO
DE PIRACICABA-SP**

ADEODATO ARI CAVALCANTE SALVIANO

Aprovado em : 18 de dezembro de 1996

Comissão julgadora:

Prof.	Dr. PAULO LEONEL LIBARDI	ESALQ/USP
Prof.	Dr. ÁLVARO PIRES DA SILVA	ESALQ/USP
Prof ^a .	Dr ^a . MARIA HELENA MORAIS	FCA/UNESP
Pq ^a C	Dr ^a . SONIA CARMELA FALCI DECHEN	IAC/CPA/SAA
PqC	Dr. SIDNEY ROSA VIEIRA	IAC/CPA/SAA

PqC Dr. SIDNEY ROSA VIEIRA
Orientador

A LUIZ SALVIANO DE SOUZA
("in Memoriam") e MARIA
COTINHA CAVALCANTE SALVIANO,
meus pais, pelas palavras
amigas, incentivo, lições de
vida e confiança

DEDICO

À minha esposa MARGARETH
M.B.SALVIANO, meus filhos
IVANA, MAURÍCIO e CHRISTINE
e meus sogros, F. XAVIER e
IVANI, pelo apoio
imensurável, amor e carinho

e

aos meus irmãos JANDIRA,
MAURÍCIO, JACIRA e NÚBIA,
que sempre estiveram
presentes na minha vida

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus que nos dá força para enfrentar os desafios.

Ao Pesquisador Científico Dr. Sidney Rosa Vieira, pela amizade, incentivo, sugestões e valiosa orientação.

Ao Prof. Dr. Gerd Sparovek, pela amizade, apoio e empenho pessoal dedicado durante a realização do curso.

Ao meu irmão, Luiz Maurício C. Salviano, aluno da pós-graduação do CENA/USP, pelos sempre constantes, apoio, incentivo e amizade.

Aos amigos e colegas da UFPI/CCA Milcíades G. de Lima, Luiz Gonzaga Carneiro, João Batista Lopes e Agostinho V. Figueiredo, pelo apoio, amizade e convívio.

Aos meus colegas de curso de pós-graduação José Simplicio de Holanda e Fernando L. D. Cintra e demais colegas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste curso.

Às bibliotecárias Marília Henyei e Elisie Helena do CENA/USP, Kátia M. de A. Ferraz e Eliana M. G. Sabino da Biblioteca Central da ESALQ/USP, pelo apoio sempre gentil na busca de literatura e na revisão das citações bibliográficas.

À família Furlan, na pessoa do Sr. Odair Furlan, meu muito obrigado pelo apoio e cessão da área experimental.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola e Solos (DEAS)/Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade

Federal do Piauí (UFPI), pela possibilidade de realização do Curso.

Ao Departamento de Ciência do Solo/Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ)/ Universidade de São Paulo (USP), pela acolhida amiga de seus docentes e pessoal técnico e administrativo.

À Seção de Conservação do Solo do Instituto Agrônômico, da CPA, Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo, pelo apoio.

À CAPES/PICD pela concessão de apoio financeiro.

À FAPESP pelo financiamento da pesquisa. Processo N°95-1071/9.

À Sementes Pirai, na pessoa do Dr. José Aparecido Donizetti Carlos.

SUMÁRIO

	Páginas
RESUMO.....	x
SUMMARY.....	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. Métodos empregados nos estudos de efeitos da erosão sobre a produtividade e a recuperação do solo.....	7
2.1.1. Experimentos em casa-de-vegetação.....	8
2.1.2. Experimentos com remoção e adição de horizontes superficiais de solos.....	10
2.1.3. Elaboração de modelos empíricos.....	11
2.1.4. Medidas feitas diretamente no campo, em áreas distintamente afetadas por erosão...	12
2.1.5. Análises geoestatísticas.....	13
2.2. A erosão afetando o rendimento das culturas.....	14
2.3. A variabilidade do solo e o planejamento experimental.....	16
2.4. A variabilidade espacial e o rendimento das culturas.....	18
2.5. Mapeamento.....	19
2.6. Geoestatística.....	20

	Páginas
2.6.1. Semivariograma.....	21
2.6.2. Krigagem.....	22
2.6.3. "Jack-knifing".....	23
2.6.4. Escalonamento de semivariograma.....	23
3.MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1. Caracterização do local.....	25
3.2. Cronograma e descrição do experimento.....	26
3.3. Determinações realizadas e procedimentos adotados.....	29
3.4. Análises estatísticas.....	30
3.4.1. Estatística descritiva.....	31
3.4.2. Geoestatística.....	31
3.5. Elaboração de mapas e matrizes de decisão.	32
3.6. Relação entre a produção de matéria seca da crotalária e a espessura do solo.....	37
4.RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1. Medidas descritivas dos atributos de plantas e de solo.....	39
4.1.1. Medidas descritivas de atributos de plantas.....	40
4.1.2. Medidas descritivas de espessura e parâmetros de fertilidade e de textura do solo.....	42
4.1.3. "Outliers".....	46
4.2. Correlação, regressão linear e regressão multivariada dos atributos do solo com os da crotalária.....	47
4.3. Dependência espacial de atributos de crotalária e de solo.....	51
4.4. Mapeamento.....	58

	Páginas
4.5. Distribuição espacial entre produção de matéria seca da crotalária em comparação com altura de planta e parâmetros de solo	63
4.5.1. Comparação de índices.....	63
4.5.2. Superposição de mapas de produção de matéria seca da crotalária com o de altura de plantas e com o de parâmetros do solo.....	65
4.6. Produção de matéria seca da crotalária e espessura do solo.....	70
5.CONCLUSÕES.....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
APÊNDICES.....	84
APÊNDICE 1.....	85
APÊNDICE 2.....	86
APÊNDICE 3.....	87
APÊNDICE 4.....	88
APÊNDICE 5.....	89
APÊNDICE 6.....	90
APÊNDICE 7.....	91

**VARIABILIDADE DE ATRIBUTOS DE SOLO
E DE *Crotalaria juncea* L. EM SOLO
DEGRADADO DO MUNICÍPIO
DE PIRACICABA-SP**

**Autor: ADEODATO ARI CAVALCANTE SALVIANO
Orientador: PqC Dr. SIDNEY ROSA VIEIRA**

RESUMO

A erosão do solo causa redução na produtividade das culturas devido às alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, além da redução da profundidade de enraizamento. Este trabalho teve por objetivo caracterizar o comportamento de atributos de crotalária (*Crotalaria juncea* L.) e de solo, em área erodida, e relacioná-los utilizando ferramentas da estatística clássica e da geoestatística.

O trabalho experimental foi desenvolvido no município de Piracicaba-SP, numa associação de podzólico vermelho-amarelo + solo litólico, em 1994/95, numa área que vem sendo explorada com cana-de-açúcar há mais de 30 anos e onde já se visualizam sulcos de erosão. A área experimental, de 50 m por 70 m, foi amostrada para todos os atributos de acordo com uma malha de 5 m por 5 m, totalizando 140 pontos amostrados. Foram avaliados atributos de fertilidade e de textura nas camadas

superficial e subsuperficial, espessura do solo e produtividade e altura da crotalária.

A análise descritiva mostrou que as medidas de posição sugerem distribuição normal dos atributos, com exceção para P e K que apontam para uma distribuição diferente da normal, enquanto que as medidas de dispersão apontam para uma distribuição não normal. Os coeficientes de variação dos atributos foram classificados como baixos ou médios, com exceção para P e K. Todos os atributos apresentaram dependência espacial, com exceção do P subsuperficial e do K superficial e subsuperficial.

O mapeamento dos atributos usando a técnica de krigagem permitiu dividir a área em cinco classes de menor variabilidade, as quais foram consideradas como zonas de manejo. Essas zonas de manejo permitiram entender melhor os efeitos da erosão sobre a produtividade da crotalária. Os parâmetros derivados do H+Al foram os que tiveram a mais estreita relação com a produtividade da crotalária, destacando-se a necessidade de calagem.

A espessura do solo, quando superior a 60 cm não afetou diretamente a produtividade da crotalária, mas quando essa era menor que 20 cm, afetou-a fortemente.

**SPATIAL VARIABILITY OF SOIL ATTRIBUTES
AND OF *Crotalaria juncea* L. IN A
DEGRADED SOIL OF PIRACICABA-SP**

Author: ADEODATO ARI CAVALCANTE SALVIANO

Advisor: Dr. SIDNEY ROSA VIEIRA

SUMMARY

Soil erosion reduces crop productivity due to changes in its physical, chemical and biological characteristics, as well as reduction in crop rooting depth. The objective of this study was to characterize the soil attributes and crotalaria (*Crotalaria juncea* L.) yield in an eroded area, using the classical statistics and geostatistical tools in order to understand the relationships.

The experimental work was done in an Ultisol and Entisol association, in an area that has been planted with sugar cane for more than 30 years, showing evident erosion furrows. An experimental area of 50 m X 70 m was divided into a 5 m X 5 m grid, making 140 sampling points. Soil thickness, soil fertility, texture on the surface and subsurface layers and, height and yield of cratalaria were evaluated.

Descriptive statistical analysis showed that position measures indicate normal distribution for the attributes, except for P and K. On the other hand, dispersion measurements suggest a non normal distribution. The coefficients of variation were classified as low or medium, except for P and K for which they were high. All the attributes, except P subsurface and K surface and subsurface, presented spatial dependence.

Mapping the attributes, using kriging techniques, allowed to divide the area in five classes of lower variability, referred to as homogeneous management zones. Through these zones of management it was possible to understand the effects of soil erosion on crotalaria productivity. Parameters derived from H + Al presented closer relationship with crotalaria productivity, showing the need for liming.

When soil thickness values were higher than 60 cm it did not affect directly crotalaria productivity, whereas when it was less than 20 cm, crotalaria productivity was strongly affected.

1. INTRODUÇÃO

A agricultura moderna tem como fundamento o desenvolvimento sustentável que objetiva o econômico sem desprezar e/ou degradar o ambiente. É o desenvolvimento harmonioso e desejável. Uma exploração agrícola sustentável requer, entre outros fatores, a manutenção e/ou a melhoria da qualidade do solo. No entanto, o que está bem evidente é que, nas três últimas décadas, houve uma expressiva expansão da atividade agrícola no Brasil, não respeitando a capacidade de uso das terras, nem tampouco praticando um manejo racional.

A intensificação da exploração agrícola, aliada ao uso e manejo inadequado do solo, tem provocado aumento da erosão — a chamada erosão acelerada. Esta provoca o assoreamento e a poluição das áreas baixas, rios e reservatórios podendo, até mesmo, chegar à degradação de grandes extensões de terras. Os efeitos negativos da erosão se refletem dentro e fora da área erodida, na qual seu principal efeito negativo é a redução da produtividade do solo.

Para se conhecer a extensão dos prejuízos da erosão do solo sobre o rendimento das culturas, faz-se necessário o conhecimento da quantidade de solo que se está perdendo e o limite de tolerância dessa perda, a partir do qual a capacidade produtiva do solo fica comprometida. Informações sobre as relações entre erosão e rendimento das culturas

são importantes para a definição de uma política de desenvolvimento agrícola, bem como para o estabelecimento das práticas de uso e manejo a serem adotadas a fim de garantir a sustentabilidade do cultivo da terra. Embora muitos trabalhos tenham sido desenvolvidos para avaliar as perdas de solo causadas por determinados sistemas de manejo, poucos são os que têm estimado o efeito dessa perda no rendimento das culturas.

A justificativa para o reduzido número de trabalhos relacionando a erosão com o rendimento das culturas pode ser a falta de uma metodologia mais apropriada para se analisar essa relação, nas condições em que ela acontece no campo. Outro aspecto a ser considerado é a aplicação da estatística adequada para comparação de tratamentos, uma vez que, de modo geral, experimentos de uso e manejo exigem parcelas grandes e com muitas repetições para que se possam detectar os efeitos dos tratamentos.

Para que se possam empregar os testes de comparação entre tratamentos, a estatística clássica exige que a variável em estudo tenha uma distribuição normal e que observações vizinhas sejam independentes umas das outras. Entretanto, vários trabalhos mostram que as propriedades do solo e atributos das culturas não variam ao acaso, mas apresentam algum tipo de correlação ou dependência espacial. Portanto, os experimentos de uso e manejo do solo poderiam estar violando os pressupostos básicos da análise de variância, devido à variabilidade do solo não ser aleatória, o que poderia implicar em uma interpretação errônea dos resultados. Este aspecto assume maior relevância quando se estuda uma área que sofreu processo de erosão acelerada pois, devido à sua ação desuniforme, causa variabilidade nas propriedades físicas, químicas e

biológicas. Neste caso, é evidente que a análise da estatística clássica, por si só, é insuficiente para retratar fielmente os efeitos dos tratamentos, precisando-se de formas complementares ou mesmo da definição de novos delineamentos experimentais.

O emprego da geoestatística, com o objetivo de avaliar a estrutura espacial das variáveis, introduz uma nova e importante dimensão para a análise da interação entre propriedades do solo e atributos das culturas em áreas com processo acelerado de erosão.

As ferramentas da geoestatística permitem análise de dependência espacial e também a estimativa de dados para locais não amostrados, por meio de um estimador sem tendenciosidade. Com a utilização dessas ferramentas pode-se analisar, adequadamente, dados de experimentos em solos sob condições de erosão acelerada, com a possibilidade de obter-se informações não reveladas pela estatística clássica.

Este trabalho teve por objetivos:

1. caracterizar o comportamento de atributos da *Crotalaria juncea* L. e de solos, em uma área intensamente erodida;
2. determinar a dependência espacial da produtividade e dos atributos de solo mais relacionados com a produtividade;
3. confeccionar mapas de produtividade e de atributos de solo mais relacionados com a produtividade, e de superposição de produtividade com atributos do solo e
4. relacionar a produtividade da crotalária juncea e os atributos do solos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A exploração agrícola com o uso e manejo inadequado do solo vem intensificando o processo de erosão, mais comumente conhecido como erosão acelerada. Essa, por sua vez, está provocando sérios problemas em todo o mundo, que vão desde o assoreamento de áreas baixas e corpos d'água, até a degradação de extensas áreas. A erosão do solo tem relação direta com a escassez de alimentos, e portanto, com a fome. As terras erodidas têm sua capacidade produtiva reduzida, podendo chegar, às vezes, a uma produção anti-econômica; por isso, em algumas regiões do mundo, a luta contra a erosão é fundamental, chegando mesmo a representar uma verdadeira batalha pela sobrevivência.

As consequências maléficas da erosão acelerada nas propriedades agrícolas, tanto do ponto de vista socio-econômico como do ponto de vista ambiental, nos municípios, nos estados, e portanto, nos países, quase sempre não são possíveis de serem dimensionadas com exatidão. Nesse sentido, Lal (1988) apresentou algumas consequências de âmbito mundial: milhões de hectares de solos férteis tornam-se irreversivelmente degradados; a produtividade de milhões de hectares, a cada ano é reduzida a zero ou é economicamente inviável devido à degradação causada pela erosão; e, estima-se que os danos causados pelos sedimentos nos Estados Unidos custem US\$ 6 (seis) bilhões anualmente,

dos quais US\$ 570 milhões são apenas para dragagem de milhões de metros cúbicos de sedimentos em rios.

Relatório do Programa para O Meio Ambiente das Nações Unidas (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAM, 1991) apresentou um quadro bastante preocupante sobre a degradação do solo provocada pelo homem (Tabela 1). Observa-se, nos dados apresentados, que quase 1/5 da área produtora de biomassa do planeta encontra-se degradada, sendo que na América Central esta degradação atinge 1/4 da área total.

No Sul do Brasil estima-se que, dos 15.750.000 ha de latossolos e terra roxa, cultivados com a sucessão trigo-soja, 26% estão em franco processo de degradação (Mielniczuk & Schneider, 1984). Os autores ressaltaram que 375.000 ha no Rio Grande do Sul e 600.000 ha no Paraná estão com problemas críticos de erosão e num estágio praticamente de irreversibilidade para culturas anuais.

É do conhecimento geral que a erosão acarreta redução na produtividade do solo — capacidade do solo de produzir, em ambiente natural, determinada planta ou seqüência de plantas sob um específico sistema de manejo. Por isso, existe um limite de perdas de solo considerado como aceitável, porque não afeta a capacidade produtiva do solo, cujo conhecimento torna-se muito importante para o planejamento agrícola.

A relação entre erosão e produção das culturas depende da característica do perfil do solo, do crescimento da cultura, do manejo do solo e do microclima (Lal, 1985). O autor acrescentou que, em solos com subsolo edafologicamente favorável, a perda da camada superficial

Tabela 1. Degradação do solo provocada pelo homem

Continente/região	Área degradada em milhões de ha	% em relação ao total da área produtora de biomassa
Mundo	1964	17
Europa	219	23
África	494	22
Ásia	746	20
Austrália	103	13
América do Sul	243	14
América Central	63	25
América do Norte	96	5

Fonte: UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAM, 1991.

do solo representa, basicamente, perdas de nutrientes que podem ser repostos, embora significando aumento de custos. Nestes casos, a adição de fertilizantes pode compensar a perda de parte ou de toda a camada superficial do solo erodido. Em solo com subsolo edafologicamente inferior e com pouca profundidade de enraizamento, a produtividade da cultura diminui com a redução da espessura da camada superficial do solo e a adição de fertilizantes não compensa a perda da camada superficial. Lal (1985) acrescentou que, entre os dois extremos, existem solos com média profundidade de enraizamento. Nestes, embora a perda de parte da espessura superficial possa ser compensada pela

adição de fertilizantes, sinais de erosão acelerada podem facilmente mascarar o emprego de práticas de adubação. Nas regiões tropicais, os solos têm, de modo geral, suas reservas concentradas nas camadas superficiais. São solos inférteis quando expõem os subsolos e a produtividade pode declinar mais rapidamente com pequenas perdas, contrastando com os solos férteis das regiões temperadas.

Informações sobre o comportamento do solo em termos de produção das culturas, bem como da erosão que nele ocorre, são essenciais para um planejamento estratégico de desenvolvimento agrícola e seleção apropriada de manejo de práticas para uma exploração agrícola sustentável. Embora inúmeras pesquisas tenham sido feitas para avaliar as perdas do solo causadas por determinados sistemas de manejo, poucos estudos têm estimado o efeito da erosão no rendimento das culturas. Sobre este tema, existem poucos trabalhos na literatura nacional (Silva et al., 1985; Dedeczek, 1987; Sparovek et al., 1991, 1993).

2.1. Métodos empregados nos estudos de efeitos da erosão sobre a produtividade e a recuperação do solo

Os métodos mais empregados para os estudos das relações entre erosão e produtividade das culturas são: 1) ensaios em casa-de-vegetação; 2) remoção e adição de horizontes superficiais de solos; 3) elaboração de modelos empíricos; 4) medidas feitas diretamente no campo, em áreas distintamente afetadas por erosão; 5) análises geoestatísticas.

2.1.1. Experimentos em casa-de-vegetação

Consiste na coleta de solos em diferentes profundidades para serem cultivados em casa-de-vegetação, utilizando-se uma cultura indicadora do potencial produtivo do solo. Com este método é possível obter-se maior controle específico de variáveis como estresse hídrico e desbalanceamento de nutrientes para comparação de produtividade das diferentes fatias do solo. Como desvantagens, são citadas a artificialidade das condições do solo (remoção e distúrbios) e a pequena quantidade de material para o desenvolvimento da planta, o que leva a condições de estresses (Stocking, 1985).

Aina & Egolun (1980) conduziram experimento utilizando essa metodologia, em Alfisol, para verificar o efeito das adubações orgânica e mineral na melhoria da produtividade do subsolo (camada de 15-30 cm), comparando com a camada superficial (0-15 cm). Usaram três níveis de esterco (0; 0,03 e 0,06 g/g na base de solo seco) e dois níveis de fertilizantes minerais (0 e completo - consistindo de 100 ppm de N, 40 ppm de P e 100 ppm de K). Os autores encontraram que a altura de planta na camada superficial (0-15 cm) foi superior em 18% e 26% à da camada de subsolo (15-30 cm), respectivamente, para 32 e 48 dias após o plantio, quando não foram utilizados adubos orgânicos e/ou minerais. Com relação à adição de esterco, os autores encontraram incrementos da produção de 34% e de 26%, no nível de esterco de 3%, nas camadas de 0-15 cm e de 15-30 cm respectivamente, depois de 48 dias do plantio, e acrescentaram que os fertilizantes minerais tiveram efeitos complementares. Quando consideraram a produção de massa seca da parte aérea, a combinação de fertilizantes mineral

e orgânico deu resultados praticamente equivalentes entre a camada superficial e subsuperficial. A produção de massa seca do sistema radicular também refletiu esta tendência. Os autores comentaram, ainda, que os sintomas de deficiências de fósforo apareceram duas semanas após o plantio no tratamento com subsolo não adubado. A deficiência de N apareceu, porém, após três semanas nos tratamentos com adubação orgânica, havendo, logo depois, uma recuperação das plantas.

Mbagwu (1985), também fazendo uso da metodologia de casa-de-vegetação, comparou a eficiência de vários resíduos orgânicos e fertilizantes minerais na melhoria da produtividade de um Ultisol, no Sudeste da Nigéria. Os níveis de adubos orgânicos foram de 0 e 5% e de fertilizantes minerais de 0 e completo (consistia de 60 ppm de N, 15 ppm de P, 60 ppm de K e de 20 ppm de Mg). Foram utilizadas, também, combinações de fertilizantes orgânicos e minerais. A planta-teste foi o milho e foram avaliadas a altura de planta e a produção de matéria seca. O autor concluiu que a aplicação de fertilizantes inorgânicos teve mais influência no aumento de altura de plantas na camada superficial (0-20 cm) do que na do subsolo (20-40 cm). No entanto, a aplicação de adubos orgânicos foi mais eficiente na camada do subsolo. Com relação à produção de massa seca, todos os tratamentos que envolveram a adição de matéria orgânica foram superiores à aplicação de apenas fertilizantes inorgânicos, com exceção do tratamento em que se usou serragem. O autor ressaltou, porém, que este estudo não é conclusivo, pois foi realizado em casa-de-vegetação, ou seja, em condições artificiais.

2.1.2. Experimentos com remoção e adição de horizontes superficiais de solos

Esta metodologia consiste na remoção ou adição de camada de solo no sentido de variar a espessura do mesmo. Este método é usado em área quase sem declividade e tem, assim, a vantagem de eliminar a variabilidade da produção, devido à posição na paisagem (Olsen et al., 1994). A técnica de remoção possibilita um bom controle sobre as fontes de variações externas, tornando possível a comparação de diversos métodos de recuperação de produtividade e a extrapolação dos resultados com relativa segurança para as condições de erosão por chuva natural (Sparovek et al., 1991). A remoção artificial do solo subestima o efeito na redução da produtividade pela erosão, devido à ação seletiva da erosão natural, que carrega as partículas mais finas e/ou mais leves, como a argila e a matéria orgânica (Stocking, 1985). Lal (1985) encontrou um declínio de 16 vezes na produtividade do milho pela erosão natural quando comparado com a remoção artificial do equivalente de espessura superficial. O mesmo autor observou que, em parcelas com 1,5% de declividade, apenas 2,5 mm da espessura superficial tinham sido removidos após cinco anos de experimento, mas o efeito sobre o rendimento do milho foi equivalente ao da remoção artificial de 10 cm de espessura da superfície do solo.

Dedecek (1987), trabalhando em latossolo vermelho-escuro álico argiloso, no CPAC/EMBRAPA, Planaltina-DF, removeu artificialmente camadas de solos de espessuras de 0; 2; 5; 10 e 20 cm, usou dois níveis de fertilizantes: 1) 400 kg da fórmula (0-20-20) e 750 kg de calcário, 2) 500 kg da fórmula (0-20-20) e 1500 kg de calcário dolomítico e

cultivou soja. No nível 1 de adubação houve redução de 16, 32, 47 e 67% na produção de soja para a remoção de 2, 5, 10 e 20 cm de camada de solo, respectivamente, quando comparado com o controle sem remoção do solo. No nível 2 de adubação as reduções de produção foram de 5, 14, 36 e 65%, nas mesmas condições do nível 1. O autor concluiu que a adubação e a correção do solo reduziram o efeito da remoção artificial no 1º ano, porém não o eliminou, mesmo quando a camada de solo retirada foi de 2 cm.

Sparovek et al. (1991) conduziram trabalho de remoção artificial de camadas de solo, num podzólico vermelho-escuro latossólico endoálico de textura argilosa, no município de Piracicaba - SP. Removeram artificial e gradualmente a camada de 0-45 cm e testaram dois sistemas de recuperação da produtividade: T1- calagem com NPK Zn+esterco e T2- calagem + NPK+Zn , comparando-os ao tratamento testemunha (T3). Considerando a mesma intensidade de remoção de terra, a produtividade decresceu do tratamento T3 para o T1. A produtividade do tratamento T2, com remoção de camada de solo acima de 25 cm, foi semelhante à da testemunha (T3), sem remoção.

2.1.3. Elaboração de modelos empíricos

Existem diferentes índices que tentam relacionar a erosão com a produtividade da área. Rijsberman & Wolman (1985) discutiram um modelo matemático para a determinação do rendimento das culturas no qual as curvas são adimensionais e variam de 0 a 1,0. O modelo pressupõe que o solo é o maior determinante do rendimento das culturas, que a capacidade produtiva do solo depende da camada do seu

perfil e a suficiência de cada fator em particular é baseada nas curvas de respostas aos valores para cada fator (0 a 1,0). Este modelo foi desenvolvido para regiões de condições específicas, mas pode muito bem ser adaptado a outras condições, desde que se considerem parâmetros locais que tenham maior importância para a produção das culturas, como por exemplo, o teor de fósforo nos solos do Brasil, que é um dos fatores mais limitantes para algumas regiões do país. Portanto, o uso deste modelo implica em um aprofundado conhecimento dos fatores relacionados com a produtividade do solo, para cada caso específico.

Sparovek et al. (1993), adotando um modelo simples, relacionaram o rendimento do arroz (*Oryza sativa* L.) com perdas de solo por erosão, em oito solos da região de Piracicaba-SP, utilizando camadas estratificadas de solo. Concluíram que, na camada de 0-10 cm, a matéria orgânica e o pH tiveram grande influência no rendimento do arroz, enquanto que em profundidades maiores, os parâmetros que influenciaram foram o pH e os teores de fósforo e magnésio disponíveis.

2.1.4. Medidas feitas diretamente no campo, em áreas distintamente afetadas por erosão

As medidas feitas diretamente no campo refletem com maior precisão as relações entre produtividade e erosão, pelo fato desta ter sido provocada pela condição de chuva natural (Sparovek et al., 1991). Como limitações da metodologia, os autores ressaltam as dificuldades: 1) de quantificação da intensidade de erosão ocorrida nos diferentes locais de medições; 2) de obtenção das mesmas

condições de plantio em locais distintos; 3) de comparação de tratamentos de recuperação de produtividade do solo. Esta metodologia requer uma duração do experimento de, no mínimo, 10 anos, usando-se parcelas de perdas de solos e água, acrescentando que o período pode ser reduzido, se forem utilizados simuladores de chuvas (Stocking, 1985).

Lal (1981) implantou, em 1971, parcelas experimentais em áreas com diferentes declividades (1, 5, 10 e 15%) e monitorou o sistema de 1971 a 1976, computando a erosão ocorrida em cada caso. As parcelas, algumas com subsolagem e outras não, receberam fertilizantes, e as perdas de terra, devido à erosão, foram em média de $8,77 \text{ Mg ha}^{-1}$, nas áreas com 1% de declividade, correspondendo a uma camada de 0,63 mm, enquanto que nas parcelas com 10% de declividade, a média das perdas de terra foi de 220 Mg ha^{-1} , equivalendo a uma camada de 15,76 mm de espessura. Com relação ao rendimento do milho nos tratamentos sem subsolagem, caiu, em média, de $2,49 \text{ Mg ha}^{-1}$ nas áreas que perderam 15,76 mm de espessura superficial, para $4,57 \text{ Mg ha}^{-1}$ nas áreas que perderam em média 9,67 mm de espessura superficial. Quando se compararam as áreas subsoladas, os valores de produtividade variaram de $4,06 \text{ Mg ha}^{-1}$, nas áreas que perderam 15,76 mm de espessura, para $5,59 \text{ Mg ha}^{-1}$ nas áreas que perderam 0,63 mm de espessura superficial.

2.1.5. Análises geoestatísticas

A geoestatística consiste na aplicação da teoria das variáveis regionalizadas (Oliver, 1987). As ferramentas da geoestatística foram, originalmente, utilizadas na mineração industrial. Mas, nos anos recentes, essas

ferramentas tornaram-se um poderoso instrumento para a pesquisa em ciência do solo, sendo usadas para caracterizar e mapear a variabilidade espacial de atributos de solo e de plantas, assim como para estimar dados em locais não amostrados. A análise de parâmetros de solo e de plantas por meio das ferramentas da geoestatística pode ajudar a identificar causa e efeito da relação entre estes parâmetros (Tabor et al., 1984). Sob condições de erosão acelerada, a variabilidade espacial inerente ao solo poderá ser mais claramente expressa na variação do desenvolvimento e produção das culturas (Miller et al., 1988).

Bhatti et al. (1991a), trabalhando em um complexo de morro erodido, na região de Washington, encontraram uma forte relação entre os padrões espaciais de rendimento do trigo e dos teores de fósforo no solo com os de matéria orgânica no solo. Miller et al. (1988), trabalhando em área sob erosão, na região de Sacramento-CA, encontraram, também, forte relação espacial entre propriedades do solo (matéria orgânica do solo) e produção de trigo.

2.2. A erosão afetando o rendimento das culturas

A erosão acelerada reduz a produtividade do solo, como consequência das modificações nas características e propriedades do solo, além da redução da profundidade de enraizamento.

O processo erosivo é muito seletivo, carreando, principalmente, partículas que apresentam grandes áreas superficiais específicas, justamente as que retêm maiores quantidades de nutrientes. A matéria orgânica é a fração perdida em maior quantidade, o que provoca a degradação da estrutura do solo. A disponibilidade do nitrogênio está

concentrada quase que totalmente na camada de 0 a 30 cm na forma de matéria orgânica, o que acontece também com 50% do fósforo disponível (Langdale & Shrader, 1982).

As áreas declivosas têm produtividade desuniforme, devido às diferentes condições de solo para o desenvolvimento das plantas. Hanna et al. (1982) encontraram que a disponibilidade de água é influenciada pela posição topográfica do local amostrado na paisagem. A água é importante, tanto para o desenvolvimento das plantas como para a formação do solo. O local numa paisagem interfere neste processo, devido à maior ou menor quantidade de água, o que provavelmente aumenta a variabilidade do mesmo. Ciha (1984) encontrou que a posição de um ponto amostrado na paisagem teve forte influência sobre o rendimento da cultura do trigo. O autor relacionou este fato a propriedades do solo como espessura da camada superficial e a diferentes níveis de disponibilidade de água ao longo do relevo.

A erosão reduz a espessura da camada superficial do solo afetando a disponibilidade de nutrientes, capacidade de armazenamento de água e profundidade de enraizamento (Power et al., 1982; Stocking & Peake, 1986 e Mokma & Sietz, 1991). Power et al. (1982) encontraram uma relação direta entre o aumento da espessura da camada superficial e o conteúdo de nitrogênio e de fósforo na planta, resultando numa superior qualidade da produção do trigo. Sessay & Stocking (1995) verificaram que a diminuição da produtividade das culturas (milho e feijão-de-corda) estava fortemente associada à redução do horizonte A, embora esta variável esteja relacionada a outras variáveis do solo.

2.3. A variabilidade do solo e o planejamento experimental

A pesquisa agronômica tem, constantemente, lançado mão de ferramentas da estatística clássica para testar diferenças entre tratamentos. Porém, quando se depara com uma situação onde a variabilidade do parâmetro estudado é muito grande, encara-a como uma dificuldade e, normalmente, muitos dados deixam de ser analisados e publicados, por se considerar que esta variabilidade é um erro (Reichardt et al., 1986). Vieira & De Maria (1994) citaram a necessidade de se fazer uso de parcelas grandes e com muitas repetições em experimentos de uso e manejo de solos, para se ter maior sensibilidade à heterogeneidade do solo. No entanto, ressaltaram que, para conter gastos, poucas repetições dos tratamentos são feitas. Assim, os autores concluíram que a probabilidade de se detectarem diferenças entre tratamentos é baixa nesses experimentos, pois algumas propriedades do solo têm grande variação, o que exigiria um maior número de repetições.

A aplicação das ferramentas da estatística clássica na experimentação agrícola, para que se possam empregar testes de comparação entre tratamentos, está vinculada à observância dos pressupostos básicos da análise de variância, tais como: 1) independência entre as parcelas experimentais; 2) independência e homogeneidade entre os erros entre parcelas; 3) aditividade dos efeitos. No entanto, vários trabalhos têm mostrado que os parâmetros de solos apresentam correlações ou dependências (Vieira et al., 1983; Prevedello, 1987, Scott et al., 1994; Cambardella et al., 1994; Cahn et al., 1994 e Paz et al., 1996). Outros trabalhos têm evidenciado que os atributos de produção de plantas também não são aleatórios e seguem

comportamento espacial (Vieira et al., 1987; Tabor et al., 1984; Mulla, 1993 e Salviano et al., 1995).

A variabilidade do solo não sendo aleatória viola os pressupostos básicos da análise de variância, (Bhatti et al., 1991b). Isto reduz a conveniência da aplicação da clássica análise de variância (Ball et al., 1993). Tal possibilidade adquire maior importância nas situações em que a variabilidade do solo é grande, como no caso de solos trabalhados intensivamente, onde a pesquisa precisa ser mais refinada, evoluindo para o teste de tratamentos com menores contrastes entre si (Souza, 1992). Ressalte-se mais que a aplicação das ferramentas da estatística clássica, por si só, passa a ser insuficiente para retratar os efeitos dos tratamentos, fazendo-se necessários procedimentos complementares ou mesmo a definição de novos delineamentos experimentais.

A variabilidade espacial das variáveis é estudada por meio das ferramentas da geoestatística (Vieira et al., 1981; Vauclin et al., 1983), que se fundamenta na teoria das variáveis regionalizadas, segundo a qual os valores de uma variável estão, de alguma maneira, relacionados à sua disposição espacial, e portanto as observações tomadas a curta distância se assemelham mais do que aquelas tomadas a distâncias maiores. Uma premissa básica é que em todas as áreas existem regiões mais ricas do que outras, para uma determinada variável. Logo, amostras tomadas numa região mais rica seriam, em média, mais ricas do que aquelas tomadas numa região mais pobre, ou seja, o valor da variável regionalizada depende de sua localização (Souza, 1992). O conhecimento da estrutura espacial de uma variável permite estimar os valores desconhecidos e os valores de variáveis correlacionadas.

2.4. A variabilidade espacial e o rendimento das culturas

A variabilidade espacial dos parâmetros de solos influencia a eficiência do manejo e o desenvolvimento da cultura e também o planejamento e a precisão da pesquisa no campo. A variação em propriedades do solo causa rendimento desuniforme, mesmo em parcelas pequenas, o que pode provocar confundimento de efeitos de tratamentos em investigação agrícola, diminuindo a eficiência da aplicação de fertilizantes em escala de campo (Mulla et al., 1990). O conhecimento da variabilidade dos parâmetros de solo é um importante passo para que se possa empregar um manejo mais adequado com relação à aplicação de fertilizantes, estratégia de amostragem e planejamento de esquema de pesquisa no campo (Bhatti et al., 1991a).

Poucos trabalhos têm sido conduzidos sobre as relações entre a variabilidade espacial dos parâmetros de solos e a variabilidade dos atributos de produção das culturas. Finke & Goense (1993) constataram que a variabilidade de rendimento da cevada, em parte, poderia ser explicada pela textura e o nível inicial de nitrogênio mineral no solo. Miller et al. (1988), conduzindo experimento que relacionava o rendimento de trigo e propriedades do solo influenciado por erosão, encontraram uma forte dependência espacial entre estes dois parâmetros. Bhatti et al. (1991a), também trabalhando com trigo, obtiveram uma forte evidência de que os parâmetros do solo e o rendimento desta cultura não seguiam modelos aleatórios e sim um modelo de dependência espacial.

Vieira et al. (1987) constataram que o efeito de resíduos de adubações nas linhas da cultura da videira

permanecia no solo depois de dez anos, sendo uma das causas da variação espacial do rendimento da crotalária.

Em estudo com variabilidade de fósforo na planta e no solo, Camelo et al. (1993/94) concluíram que a planta atuaria como diluente da variabilidade do solo e que a intensidade de amostragem poderia ser menor para o fósforo na planta do que para o fósforo edáfico. Souza (1992) sugeriu que a extensão do sistema radicular pode se constituir-se num fator de ajustamento às variáveis do solo, pelo menos à curta distância.

2.5. Mapeamento

Existe uma preocupação crescente no sentido de se reduzir a poluição agrícola, principalmente minimizar as fontes não pontuais de poluição de N nos corpos d'água, superficiais e subsuperficiais. Junta-se ao aspecto ambiental a necessidade de se aumentar a eficiência na utilização de fertilizantes, com redução de custo e aumento de produtividade. A aplicação de recomendações médias de fertilizantes pode resultar em uma super ou subfertilização de uma área, com implicações negativas no ambiente e nos custos de produção (Mulla et al., 1992). O excesso de fertilizantes, principalmente do N, pode ser carregado tanto pelo escoamento superficial, quanto pela lixiviação, contaminando as fontes de água, enquanto que a subaplicação de fertilizantes não permite que a cultura expresse todo o seu potencial (Cahn et al., 1994). O mapeamento da variabilidade espacial das propriedades do solo pode reduzir os custos de produção de alimentos e de fibras e ser mais vantajoso para o ambiente (Schueller, 1992).

Borgelt et al. (1994) produziram, utilizando a krigagem, mapas de recomendações de calcário para um campo de 8,8 ha, no Leste do Texas. Observaram que as recomendações médias superestimaram a aplicação de calcário em 9 a 12% do campo, enquanto subestimavam a aplicação em 37 a 41% do campo. Os autores concluíram que a aplicação de calcário por zona de manejo é economicamente justificável, dependendo da variabilidade da acidez, da tolerância da cultura à acidez e do valor da cultura.

Mulla et al. (1992) testaram a aplicação uniforme e variada de fósforo e de nitrogênio em uma área com o processo de erosão variando de moderado a severo, na região de Palouse em Washington, e concluíram que a estratégia de dividir o campo em zonas de manejo reduz a superfertilização.

Mulla (1993) estudou a variabilidade espacial da matéria orgânica, do fósforo do solo e do rendimento do trigo, em um campo da região de Palouse em Washington, o qual foi dividido em três zonas de manejo, dependendo dos teores krigados de matéria orgânica. Concluiu que as zonas de manejo de matéria orgânica diferiram significativamente ao nível de umidade, N residual e rendimento de trigo, e que a aplicação de fertilizantes nitrogenados por zonas de manejo foi significativamente menor que quando aplicado de maneira uniforme.

2.6. Geoestatística

A técnica da geoestatística, com o propósito de avaliar a estrutura espacial das variáveis, adiciona uma nova e importante dimensão para análise do relacionamento

entre propriedades do solo e atributos da cultura em áreas declivosas (Miller et al., 1988). A geoestatística dispõe de várias ferramentas para a análise de dependência espacial e para a estimativa de dados, mediante o uso de estimadores sem tendenciosidade.

2.6.1. Semivariograma

O semivariograma analisa o grau de dependência espacial entre amostras dentro de um campo, além de definir parâmetros necessários para a estimativa de valores para locais não amostrados, através da técnica de krigagem.

Para o cálculo do semivariograma é utilizada a expressão:

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

onde $N(h)$ é o número de amostras separadas por uma distância h , e Z representa os valores medidos para propriedades do solo ou atributos da cultura. O gráfico de $\gamma^*(h)$ versus h representa o semivariograma, e o ajuste matemático dos dados no gráfico define seus parâmetros, que são: 1- efeito pepita, **Co**, que é o valor de γ quando $h=0$; 2- quando h aumenta freqüentemente, aumenta até uma distância **a**, chamada de alcance da dependência espacial, e a partir da qual $\gamma(h)$ neste ponto é chamado de patamar (**C**), cujo valor é aproximadamente igual à variância dos dados, se ela existe; e 3- **C₁ = C - Co**. Amostras separadas por distâncias menores do que o alcance são espacialmente dependentes, enquanto aquelas separadas por distâncias maiores, não o são, ou seja, um semivariograma igual à

variância dos dados implica em variação aleatória. O alcance também é utilizado para definir o raio máximo de interpolação por krigagem, onde os pesos utilizados na ponderação podem afetar os valores estimados (Souza, 1992).

2.6.2. Krigagem

A krigagem é uma técnica usada na geoestatística para estimar valores de variáveis para locais onde as mesmas não foram medidas. Para que esta ferramenta seja usada é necessário que exista a dependência espacial definida pelo semivariograma. Assim, a krigagem é um processo onde se estimam valores de variáveis espacialmente distribuídas, a partir de valores adjacentes interdependentes.

O valor estimado da variável é dado pela expressão:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i)$$

onde N é o número de vizinhos medidos, $Z(x_i)$ utilizados na estimativa da variável e λ_i são os ponderadores aplicados a cada $Z(x_i)$, os quais são selecionados de forma que a estimativa obtida seja não tendenciosa. Isto implica em assumir duas condições:

$$(1) E[Z^*(x_0) - Z(x_0)] = 0$$

$$(2) \sigma_k^2(x_0) = E[Z^*(x_0) - Z(x_0)]^2 = \text{mínimo}$$

A estimativa de valores para locais não amostrados, através da técnica de krigagem, possibilita estabelecer um mapa da área de estudo para as propriedades do solo e atributos das culturas em estudo permitindo a definição de linhas de isovalores, as quais podem ser de grande utilidade no planejamento experimental (Souza, 1992).

2.6.3. "Jack-knifing"

A técnica de "Jack-knifing" permite avaliar a qualidade do método de estimativa de dados e, também, definir o melhor número de vizinhos mais próximos a um determinado ponto para a estimativa do valor neste ponto. A técnica é também utilizada para avaliar se o modelo do semivariograma experimental usado no processo de estimativa de dados é o que melhor se ajusta aos dados (Souza, 1992). Utilizam-se como parâmetros de decisão o erro reduzido e a variância do erro reduzido (maiores detalhes em Vieira, 1995), calculados pelas seguintes equações:

$$\overline{ER} = E \{ ER(x_i) \} = E \{ Z^*(x_i) - Z(x_i) / \sigma_k(x_i) \}^2 = 0$$

$$VAR(\overline{ER}) = E \{ ((Z^*(x_i) - Z(x_i)) / \sigma_k(x_i))^2 \} = 1$$

2.6.4. Escalonamento de semivariograma

O escalonamento de semivariograma consiste em agrupar vários semivariogramas em uma função, com base na equação:

$$\gamma^{sc} = \frac{\gamma_i^*(h)}{\alpha_i}$$

onde i vai de 1 até o número de variáveis medidas, e α é o fator de escalonamento, que pode ser adotado como o valor da respectiva variância, do patamar, do maior $\gamma^*(h)$ ou um valor próximo a este, desde que contribua para que os semivariogramas experimentais aglutinem-se em uma única função (Vieira & De Maria, 1990).

As ferramentas da geoestatística podem ajudar a compreender como as propriedades do solo são alteradas pela erosão e, por conseguinte, como esta afeta a produtividade das culturas. O entendimento da variabilidade das propriedades do solo possibilita um manejo mais adequado das terras agrícolas com o mínimo de erosão (Miller et al., 1988).

Portanto, fica evidente a necessidade de se intensificarem pesquisas no sentido de melhor entender as relações entre variabilidade de parâmetros de solo e de rendimento de culturas para que se possam melhorar a aplicação de fertilizantes, a estratégia de amostragem do solo e planejar delineamentos experimentais mais eficientes nas comparações de tratamentos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização do local

O experimento foi desenvolvido na fazenda Morro Grande, pertencente à Usina Furlan, no distrito de Tupi, município de Piracicaba, São Paulo, Brasil, situada entre as latitudes 22° 22' e 23° 45' e entre as longitudes 47° 30' e 47° 32'. A geologia local é formada por rochas do Grupo Tubarão: formações Itararé e Tatuí (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1981).

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo mesotérmico úmido subtropical, de inverno seco, Cwa (BRASIL, 1960). O regime térmico dos solos é hipertérmico (Oliveira et al., 1976). A média anual de temperatura do ar é de 20,8 °C, sendo a temperatura média do mês mais quente do ano superior a 22 °C. A precipitação anual média do período de 1977 a 1990 foi de 1257 mm, sendo que os meses de maiores precipitações são janeiro (220 mm), dezembro (198 mm) e fevereiro (184 mm) (Ometto, 1991).

O solo da área experimental foi classificado como uma associação de podzólico vermelho-amarelo álico ou distrófico, Tb, A moderado, textura arenosa/média, pouco profundo ou não + solos litólicos indiscriminados, substrato arenitos, siltito e diamictito da formação

Itararé (Vidal-Torrado, 1994). O relevo da área é ondulado com declividade superior a 8%, observando-se variações na espessura do solo, devido ao processo de erosão, já sendo possível a visualização de sulcos (Figura 1). A área experimental vem sendo utilizada para monocultura da cana-de-açúcar por mais de 30 anos, onde os trabalhos de cultivo se desenvolvem sem uma preocupação maior com a conservação do solo. A adubação usual consiste na aplicação de 500 kg ha⁻¹ da fórmula 17-7-21.

3.2. Cronograma e descrição do experimento

Em 2 de novembro de 1994, a área experimental, de 70 m por 50 m, foi estaqueada, obedecendo a uma malha com espaçamento regular de 5 m entre pontos, o que resultou num retângulo de 10 colunas e 14 linhas, sendo que as 10 colunas foram orientadas no sentido perpendicular à direção de maior declividade do terreno e 14 linhas paralelas no sentido da maior declividade da área, perfazendo um total de 140 pontos para a amostragem.

A amostragem do solo, em 3 e 4 de novembro de 1996, para efeito de análises de granulometria e de fertilidade, foi realizada em cada um dos 140 pontos (Figura 2), nas profundidades de 0-20 cm (superficial) e 20-40 cm (subsuperficial). Determinou-se, também, a espessura do solo (ES).

A área experimental foi submetida, em 21 de novembro de 1994, a uma aração e uma gradagem com aplicação e

Figura 1. Mapas tridimensionais da espessura do solo (a) e do relevo da área (b)

Figura 2. Esquema de amostragem do experimento.

incorporação de calcário, na base de 4 Mg ha⁻¹, e em 1º de dezembro do mesmo ano, foi feito o plantio, a lanço, de crotalária juncea (*Crotalaria juncea* L.), na base de 30 kg ha⁻¹ de sementes. Devido à escassez de chuvas no período, houve problema de germinação e, por isso, foi realizado o replantio no dia 15 de dezembro de 1994, utilizando-se o procedimento anterior.

A colheita da parte aérea da crotalária juncea foi realizada no início de sua floração, em março de 1995.

3.3. Determinações realizadas e procedimentos adotados

As amostras de solos foram submetidas a determinações de granulometria, no Laboratório da Seção de Conservação do Solo do IAC; e as químicas, no Laboratório do Departamento de Química da ESALQ/USP, onde se analisaram os parâmetros de fertilidade pelo método de extração com resina trocadora de íons (fósforo, matéria orgânica, pH, potássio, cálcio, magnésio e hidrogênio + alumínio trocável). Calcularam-se, então, a capacidade de troca de cátions (T), soma de bases (S) e saturação por bases (V%). Os métodos usados foram: para o P, solução de molibdato; para o Ca e o Mg, solução de lantânio a 0,1%; para a matéria orgânica, dicromato de Na a 4N em ácido; para o pH, CaCl₂ e para o H+Al, solução tampão SMP. As análises foram realizadas de acordo com metodologia descrita por Raij et al. (1987).

A espessura do solo (ES), definida como a camada de solo acima do horizonte C, foi determinada através de tradagem até 120 cm. Nos casos em que o horizonte C estava exposto, nos sulcos de erosão, considerou-se a espessura do

solo como zero, independente da camada carregada do horizonte C.

A necessidade de calcário (NC) foi determinada pelo método de saturação por bases, dada pela equação :

$$NC = \frac{(V_2 - V_1) \times T}{100}$$

onde:

NC = necessidade de calcário em Mg ha⁻¹.

T = capacidade de troca de cátions.

V₁ = valor de saturação por bases dada pela análise do solo.

V₂ = valor desejado de saturação por bases dado pela cultura.

Para a crotalária juncea, adotou-se V₂ = 70% (Raij et al., 1987) e no cálculo da NC não foram considerados os valores negativos os quais ocorrem quando V₁ é maior que V₂, pois esses não têm significado prático.

A parte aérea das plantas de crotalária juncea das miniparcelas foi cortada rente ao solo e pesada. Para a determinação da altura média e do fator de correção de umidade, foram retiradas três plantas de cada parcela.

3.4. Análises estatísticas

Os atributos de solo e de planta foram analisados com o uso de ferramentas da estatística descritiva e da geoestatística.

3.4.1. Estatística descritiva

Os atributos de solo e da planta foram, inicialmente, analisados por procedimentos de análise estatística descritiva, para se ter uma visão geral de como se comportavam. As medidas estatísticas calculadas foram média, mediana, desvio padrão, valores máximo e mínimo, coeficiente de assimetria e de curtose e coeficiente de variação e estatística W. Nos casos em que os atributos estudados apresentaram "outlier", ou seja, valores maiores ou menores que 4 (quatro) desvios padrão da média (Cahn et al., 1994), esses eram descartados e, nessas situações, aplicavam-se novamente os procedimentos de análise descritiva sem os "outlier". Os dados descartados representaram, para qualquer dos atributos, sempre menos de 1,5% de cada conjunto de 140 dados.

3.4.2. Geoestatística

A análise geoestatística foi empregada para avaliar a dependência espacial dos atributos do solo e da crotalaria juncea, para interpolar dados e construir mapas. Para determinar a existência ou não da dependência espacial, utilizou-se o exame de semivariogramas, onde se considerou o comportamento do conjunto de dados de cada atributo de solo ou da planta e, no caso da existência de "outlier", estes foram descartados para a construção dos semivariogramas.

Os modelos matemáticos foram ajustados aos semivariogramas, visando deduzir os parâmetros efeito

pepita, alcance e patamar, o que foi feito pelo processo de tentativa e erro. Em caso de dúvida entre mais de um modelo para um mesmo semivariograma, aplicou-se a técnica de validação conhecida como "jack-knifing" e, como critério de decisão, considerou-se a variância reduzida. Essa técnica de validação também foi usada em situações em que o semivariograma deixava dúvida entre uma fraca estrutura espacial ou um efeito pepita puro, para facilitar a decisão sobre qual das duas opções deveria ser adotada. Os semivariogramas foram escalonados (Vieira et al. 1991), de modo a permitir um melhor resumo dos resultados e facilitar as interpretações.

Os parâmetros dos modelos ajustados a cada semivariograma foram utilizados para interpolação, pela técnica conhecida por krigagem, para se obter uma malha de 1 m por 1 m, bem menor que a amostrada em campo. Dessa maneira, cada conjunto de dados, por atributos, passou de 140 valores para 3036.

As análises de estatística descritiva e de geoestatística foram realizadas através de programas computacionais desenvolvidos por Vieira et al. (1983).

3.5. Elaboração de mapas e matrizes de decisão

Para avaliar os modelos de distribuição espacial dos atributos da crotalária e do solo e a correlação espacial entre a produtividade de matéria seca da cultura e os atributos de solo, utilizaram-se mapas e superposição de mapas. Para determinar a precisão da superposição de mapas, lançou-se mão de uma ferramenta muito usada em trabalhos de avaliação de mapas em sensoriamento remoto, que é a matriz

de erros, também conhecida como matriz de confusão ou tabela de contingência (Ortiz, 1993).

Para a construção dos mapas dos atributos e dos de superposição e também das matrizes de erros, utilizaram-se os dados krigados para uma malha de 1 m por 1 m, no total de 3036 pontos por variável. Cada conjunto de dados foi dividido em cinco classes, por critérios estatísticos, tendo como limites de classes $\bar{X} + \sigma$; $\bar{X} + 0,33 \sigma$; $\bar{X} - 0,33 \sigma$ e $\bar{X} - \sigma$. Para a espessura do solo, usou-se o critério de camadas de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e superior a 80 cm. As classes foram denominadas de MB, B, M, R, e MR, onde MB = condição muito boa, B = boa, M = média, R = ruim e MR = muito ruim. Considerou-se a classe MB como sendo a de mais alta produtividade, maior espessura do solo e mais altos teores de P, MO, Ca, Mg e maiores percentagem de areia, silte e argila. No caso da NC, foi considerado como classe MB, a de menor necessidade de calcário. Como classe MR, considerou-se a de menor produtividade de massa seca, menor espessura de solo, menores teores de P, MO, Ca e Mg, menores percentagem de areia, silte e argila e maior necessidade de calcário. Na Tabelas 2 e 3 estão apresentadas as divisões de classes e seus respectivos valores.

A matriz de erros é formada pelo conjunto de linhas e colunas (Tabela 4). Esta matriz foi construída para se conhecerem os parâmetros de solos que mais se relacionavam espacialmente com o rendimento da crotalária.

Utilizaram-se três índices para avaliar a performance das matrizes de erros construídas a partir das distribuições espaciais dos dados de produção de matéria seca de crotalária, com altura de planta e com atributos do solo.

Tabela 2. Classes de áreas e seus respectivos valores de atributos de plantas e de solo na camada superficial (0-20 cm)

Atributos	Classes ¹				
	MB	B	M	R	MR
Matéria seca (Mg ha ⁻¹)	> 10,34	> 8,90 a 10,34	> 7,48 a 8,90	> 6,03 a 7,48	≤ 6,03
Altura de planta (m)	> 2,71	> 2,56 a 2,71	> 2,41 a 2,56	> 2,25 a 2,41	≤ 2,25
Espessura do solo (cm)	> 80	> 60 a 80	> 40 a 60	> 20 a 40	≤ 20
Necessidade de calagem (Mg ha ⁻¹)	≤ 1,50	> 1,50 a 1,93	> 1,93 a 2,36	> 2,36 a 2,79	> 2,79
P (μg dm ⁻³)	> 10,95	> 8,88 a 10,95	> 6,84 a 8,88	> 4,76 a 6,84	≤ 4,76
MO (%)	> 1,33	> 1,14 a 1,33	> 0,95 a 1,14	> 0,76 a 0,95	≤ 0,76
pH (unid.)	> 4,50	> 4,38 a 4,50	> 4,26 a 4,38	> 4,14 a 4,26	≤ 4,14
Ca (cmol _c kg ⁻¹)	> 1,53	> 1,27 a 1,53	> 1,00 a 1,27	> 0,73 a 1,00	≤ 0,73
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	> 0,57	> 0,46 a 0,57	> 0,35 a 0,46	> 0,24 a 0,35	≤ 0,24
H+Al (cmol _c kg ⁻¹)	≤ 2,73	> 2,73 a 3,42	> 3,42 a 4,09	> 4,09 a 4,78	> 4,78
S (cmol _c kg ⁻¹)	> 2,19	> 1,83 a 2,19	> 1,48 a 1,83	> 1,12 a 1,48	≤ 1,12
T (cmol _c kg ⁻¹)	> 6,56	> 5,79 a 6,56	> 5,03 a 5,79	> 4,26 a 5,03	≤ 4,26
V (%)	> 38,7	> 33,38 a 38,7	> 28,11 a 33,38	> 22,75 a 28,11	≤ 22,75
Areia (g kg ⁻¹)	> 821	> 798 a 827	> 776 a 798	> 753 a 776	≤ 753
Argila (g kg ⁻¹)	≤ 85	> 85 a 96	> 96 a 107	> 107 a 117	> 117
Silte (g kg ⁻¹)	> 134	> 122 a 134	> 110 a 122	> 98 a 110	≤ 98

1- MB = muito boa, B = boa, M = média, R = ruim e MR = muito ruim

Tabela 3. Classes de áreas e seus respectivos valores de atributos de solo, na camada subsuperficiais (20-40 cm)

Atributos	Classes ¹			
	MB	B	M	MR
Necessidade de calagem (Mg ha ⁻¹)	≤ 1,48	> 1,48 a 2,14	> 2,14 a 2,80	> 2,80 a 3,46
MO (%)	> 1,22	> 1,03 a 1,22	> 0,84 a 1,03	> 0,65 a 0,84
pH (unid.)	> 4,56	> 4,44 a 4,56	> 4,31 a 4,44	> 4,18 a 4,31
Ca (cmol _c kg ⁻¹)	> 1,76	> 1,46 a 1,76	> 1,17 a 1,46	> 0,88 a 1,17
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	> 0,61	> 0,50 a 0,61	> 0,39 a 0,50	> 0,28 a 0,39
H+Al (cmol _c kg ⁻¹)	≤ 2,82	> 2,82 a 3,81	> 3,81 a 4,79	> 4,79 a 5,79
S (cmol _c kg ⁻¹)	> 2,46	> 2,05 a 2,46	> 1,64 a 2,05	> 1,23 a 1,64
T (cmol _c kg ⁻¹)	> 7,47	> 6,58 a 7,47	> 5,71 a 6,58	> 4,82 a 5,71
V (%)	> 41,2	> 34,7 a 41,2	> 28,4 a 34,7	> 21,9 a 28,4
Areia (g kg ⁻¹)	> 784	> 763 a 784	> 741 a 763	> 720 a 763
Argila (g kg ⁻¹)	≤ 102	> 102 a 122	> 122 a 142	> 142 a 162
Silte (g kg ⁻¹)	> 117	> 107 a 117	> 96 a 107	> 85 a 96

1- MB = muito boa, B = boa, M = médio, R = ruim e MR = muito ruim

Tabela 4. Representação da matriz de erros

Classes de produção da crotalaria juncea			Atributos de solo				
			MB	B	M	R	MR
			()	()	()	()	()
MS	MB	()	AA	BA	CA	DA	EA
	B	()	AB	BB	CB	DB	EB
	M	()	AC	BC	CC	DC	EC
	R	()	AD	BD	CD	DD	ED
	MR	()	AE	BE	CE	DE	EE

Onde:

A diagonal principal é representada por: AA, BB, CC, DD e EE.

A concordância associada é representada por: AA, BA, AB, BB, CB, BC, CC, DC, CD, DD, DE, DE e EE.

Os índices adotados foram:

1. % concordância global - representada pelo somatório dos pontos da diagonal principal dividido pelo número total de pontos amostrais (Congalton, 1991). Ressalte-se que, nesse caso, os dados estão em porcentagens e, portanto, foram divididos por 100.
2. % das concordâncias associadas - representada pelo somatório da diagonal principal com os vizinhos mais próximos do lado direito e/ou esquerdo (Tabela 4).
3. Estatística Kappa (K), segundo Congalton et al. (1983):

$$Kappa (K) = \frac{\theta_1 - \theta_2}{1 - \theta_2}$$

Onde

$$\theta_1 = \sum_{i=1}^r x_{ii} / N$$

θ_1 = Concordância global.

$$\theta_2 = \sum_{i=1}^r (x_{i+} \cdot x_{+j}) / N^2$$

r = número de linhas da matriz;

x_{ij} = número de observações na linha i e coluna j ;

x_{i+} e x_{+j} = os totais marginais da linha i e da coluna j , respectivamente; e

N = o número total de observações.

Todos os mapas de sobreposições foram construídos a partir dos modelos de determinação da concordância associada, nas matrizes de erros, onde MB* é a classe muito boa de produção de matéria seca de crotalária juncea associada às condições muito boa e boa do atributo; B* é a condição de produção boa associada à de muito boa, boa e média do atributo; M* é a de média produção associada às de boa, média e ruim do atributo; R* é a condição de produção ruim associada às de média, ruim e muito ruim do atributo; e MR* é a condição de produção muito ruim associada às de ruim e muito ruim do atributo e X representa as áreas consideradas como divergentes pelo índice de concordância associada (Tabela 4).

3.6. Relação entre a produção de matéria seca da crotalária e a espessura do solo

Para compreender melhor a relação entre a produção de matéria seca da crotalária e a espessura do solo,

agruparam-se os dados de produtividade em relação às espessuras do solo, nas camadas de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 e 100-120 cm. Considerou-se cada camada como um tratamento e submeteram-se os dados de produção à análise de variância. Utilizou-se o teste Tukey para comparação de médias da produção da crotalária.

Os valores médios de cada camada de solo e de produção foram ajustados com a análise de regressão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Medidas descritivas dos atributos de plantas e de solo

A análise exploratória e individual dos conjuntos de dados dos atributos de planta e de solo por meio de medidas descritivas, de posição e de dispersão, é essencial para se ter uma visão geral do comportamento de cada variável e, com isso, tomarem-se algumas decisões sobre os procedimentos a serem realizados. As medidas de posição ou tendência central descrevem o equilíbrio ou o centro de uma distribuição (Silveira Jr. et al., 1989), e o termo central deve-se ao fato de que, na maioria dos conjuntos de dados, o valor típico se situa na região central (Góes, 1980). As medidas de posição são: média aritmética, mediana, moda, média geométrica entre outras. As medidas de dispersão visam a fornecer o grau de variabilidade das observações, geralmente utilizando como padrão uma medida de tendência central (Silveira Jr. et al., 1989). Usam-se como medida de dispersão o desvio padrão, a amplitude e o coeficiente de variação, entre outras.

Nessa análise, os dados são tratados independentes de sua localização geográfica, e cada valor é considerado como a realização de uma mesma variável aleatória.

4.1.1. Medidas descritivas de atributos de plantas

As medidas descritivas de atributos de crotalária — produção de matéria seca (MS) e altura de planta (ALTPL) — são apresentadas na Tabela 5, as quais resumem o comportamento desses atributos em uma área com evidentes sinais de erosão (Figura 1).

Analisando-se inicialmente as medidas de posição, média e mediana, observa-se que essas são bastante próximas entre si, tanto no caso de MS como de ALTPL. A retirada de valores considerados como "outliers" não afetou essas medidas de posição, o que é um indicativo de que os dois conjuntos de dados apresentam uma certa simetria na distribuição.

A amplitude total, diferença entre o valor máximo e mínimo, variou de 1,35 a 3,08 m (1,28 vezes o valor mínimo) para ALTPL e de 1,08 a 22,54 Mg ha⁻¹ (19,9 vezes o valor mínimo) para MS. A retirada de um dado considerado "outlier" da variável MS modificou bastante a amplitude total, de 1,08 a 13,09 Mg ha⁻¹ (11,1 vezes o valor mínimo), comprovando que a amplitude total não é uma medida apropriada para representar a dispersão dos dados, pois é muito influenciada por valores perturbadores (Queiroz, 1996), além de considerar apenas dois valores do conjunto de dados.

O coeficiente de variação dos atributos de plantas (Tabela 5) pode ser classificado como baixo para ALTPL e médio para a MS, segundo critérios de Warrick & Nielsen (1980). Albuquerque et al. (1996) encontraram valor de C.V. de aproximadamente 6% para a altura de milho, em solo com horizonte A homogêneo. Bhatti et al. (1991a) também encontraram valor de coeficiente de variação de 30% para a produtividade de trigo, trabalhando em área sob processo de erosão. Essa variação é devida à heterogeneidade do solo, principalmente, relacionada com a sua espessura, variação

dos teores de nutrientes, acidez e toxicidade, textura e posição do relevo.

Os coeficientes de assimetria e de curtose dos atributos de plantas (Tabela 5) afastam-se dos valores considerados para uma distribuição normal. Com a retirada dos valores considerados "outliers", esses coeficientes aproximam-se dos de uma distribuição normal. Foi considerada para essa análise a Tabela 1 de Jones (1969) com nível de significância de 5% e usando-se o tamanho da amostra igual a 125 (o mais próximo do tamanho da amostra estudada); os intervalos de aceitação da hipótese de normalidade, nessas condições, correspondem a -0,42 a 0,42 e 2,31 a 3,94 para assimetria e curtose respectivamente.

O teste W (Shapiro-Wilk) também foi usado para testar a normalidade dos dados. Os valores de W para os atributos de plantas se aproximaram de 1, mas não foram significativos a 1% ou 5%, possivelmente pelo reduzido tamanho da amostra. A não normalidade desse conjunto de dados deve ser devida à erosão, adubação e posição na paisagem dos pontos amostrados.

As medidas de posição e de dispersão mostraram uma certa divergência com relação à normalidade dos dados. Por isso, a importância de se observar que o uso de um só parâmetro de estatística descritiva não é suficiente para caracterizar a dispersão dos dados (Libardi et al., 1996).

Os valores considerados "outliers" tiveram uma influência maior nas medidas de dispersão e, principalmente, na amplitude total, embora tenham afetado também os coeficientes de assimetria e de curtose. Com relação à média e à mediana, não houve alteração, devido à retirada de valores considerados "outliers".

4.1.2. Medidas descritivas de espessura e parâmetros de fertilidade e de textura do solo

Os valores das medidas descritivas de ES, de parâmetros de fertilidade e de textura da camada superficial (0-20 cm) encontram-se na Tabela 5 e os parâmetros de fertilidade e os de textura da camada subsuperficial (20-40 cm) estão apresentados na Tabela 6. A análise da média e da mediana mostra que apenas a variável P apresentou valores muito diferentes para essas duas medidas, tanto na camada superficial quanto na subsuperficial. Segundo Costa Neto (1990), a média e a mediana devem apresentar valores estatisticamente iguais em uma distribuição normal; portanto, as medidas de posição encontradas sugerem não haver uma distribuição normal para o P, tanto na superfície como na subsuperfície. Nas demais variáveis, não existe muita diferença entre a média e a mediana.

Observando-se os valores de máximo e de mínimo e, conseqüentemente, a amplitude total, constata-se uma grande variação que vai de 3,85 a 5,5 unidades para o pH subsuperficial (0,4 vezes o valor mínimo), a de 0,2 a 41,8 $\mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ para o P subsuperficial (208 vezes o valor mínimo). A retirada dos valores considerados "outliers" permitiu uma redução brusca nas amplitudes totais no caso das variáveis P e K nas camadas superficial e subsuperficial. Essas reduções foram, basicamente, devidas a dois valores de cada conjunto de P (os valores de 47,8 e 41,8 $\mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ para a camada superficial e os de 41,8 e 36 $\mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ para a camada subsuperficial) e a um valor de cada conjunto de K (o valor 1,15 $\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$ para a camada superficial e o de 0,44 $\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$ para a camada subsuperficial). Esses locais de elevadas concentrações de P e de K podem ser explicados pela desuniformização na aplicação desses fertilizantes e pelo fato do revolvimento do solo não ter sido suficiente para a devida uniformização.

Tabela 5. Medidas descritivas dos dados originais e com remoção de "outliers" da camada superficial (0-20 cm)

Atributos	Nº de amostras	Média	Mediana	Desvio padrão	Valor mínimo	Valor máximo	Coeficiente de variação	Coeficiente de assimetria	Coeficiente de curtose	W
Matéria seca (Mg ha ⁻¹)	140 139 ¹	8,25 8,14	8,75 8,69	2,80 2,53	1,08 1,08	22,54 13,09	34,0 31,1	0,32 -0,74	7,23 3,39	0,94 0,94
Altura de planta (m)	140 139 ¹	2,49 2,50	2,53 2,53	0,28 0,27	1,35 1,53	3,08 3,08	11,4 10,8	-0,95 -0,68	4,66 3,65	0,95 0,97
Espessura de solo (cm)	140	77,7	82,5	31,52	0	120	40,6	-0,69	2,64	0,90
Necessidade de calagem (Mg ha ⁻¹)	140	2,11	1,97	0,98	0	5,67	46,3	1,03	5,07	0,92
P (µg dm ⁻³)	140 138 ¹	8,1 7,5	6,1 6,1	7,19 5,69	0,5 0,5	47,8 32,5	88,9 75,4	2,80 2,01	12,99 7,88	0,723 0,84
MO (%)	140	1,05	1,09	0,34	0,21	1,71	32,1	-0,26	2,54	0,96
pH (unid.)	140 138 ¹	4,3 4,3	4,3 4,3	0,29 0,22	3,9 3,9	6,2 5,4	6,6 5,1	3,02 1,54	17,58 8,30	0,77 0,90
K (cmol _c kg ⁻¹)	140 139 ¹	0,11 0,10	0,09 0,09	0,10 0,05	0,01 0,01	1,15 0,28	96,4 52,3	7,68 0,95	78,01 4,19	0,503 0,935
Ca (cmol _c kg ⁻¹)	140 139 ¹	1,13 1,11	1,04 1,04	0,55 0,52	0,2 0,2	3,37 3,31	49,3 47,1	1,16 0,92	5,55 4,72	0,928 0,952
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	140 138 ¹	0,40 0,39	0,35 0,35	0,25 0,21	0,06 0,06	1,64 1,38	62,8 54,0	2,54 2,00	11,38 8,92	0,765 0,844
H+Al (cmol _c kg ⁻¹)	140	3,70	3,25	1,32	1,34	8,39	35,6	1,18	4,59	0,909
S (cmol _c kg ⁻¹)	140 139 ¹	1,65 1,62	1,50 1,50	0,80 0,75	0,4 0,4	5,2 4,8	48,9 46,2	1,67 1,41	7,55 6,65	0,878 0,906
T (cmol _c kg ⁻¹)	140	5,35	5,25	1,41	3,2	9,6	26,3	0,53	2,66	0,948
V (%)	140	30,82	28,4	12,5	7,5	79,5	40,5	1,20	5,66	0,923
Silte (g kg ⁻¹)	140	10,1	10,2	2,52	3,8	20,2	25,0	0,29	4,38	0,98**
Areia (g kg ⁻¹)	140	78,8	79,0	4,7	63,7	89,4	6,0	-0,29	3,52	0,98**
Argila (g kg ⁻¹)	140	11,2	10,7	3,6	2,6	22,7	32,4	0,61	3,22	0,96

1- dados sem "outliers".

** significativo ao nível de 1%.

Tabela 6. Medidas descritivas dos dados originais e com remoção de "outliers" da camada subsuperficial (20-40 cm)

Atributos	Nº de amostras	Média	Mediana	Desvio padrão	Valor mínimo	Valor máximo	Coefficiente de variação	Coefficiente de assimetria	Coefficiente de curtose	W
Necessidade de calagem (Mg ha^{-1})	140	2,42	2,07	1,54	0	7,47	63,7	1,03	3,91	0,92
P ($\mu\text{g dm}^{-3}$)	140	4,4	2,6	5,75	0,2	41,8	130,8	3,95	22,18	0,60
	138 ¹	3,9	2,6	3,98	0,2	26,6	102,1	2,75	13,09	0,74
MO (%)	140	0,94	0,97	0,32	0,14	1,71	34,5	-0,83	2,40	0,97*
pH (unid.)	140	4,38	4,35	0,31	3,85	5,5	7,1	1,08	4,26	0,91
K ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	140	0,07	0,07	0,04	0,01	0,44	62,2	4,72	41,75	0,71
	139 ¹	0,07	0,07	0,03	0,01	0,17	43,8	0,32	3,75	0,95
Ca ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	140	1,33	1,28	0,71	0,06	3,52	53,6	0,78	3,67	0,94
Mg ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	140	0,45	0,40	0,27	0,08	1,89	59,9	1,98	9,27	0,86
	138 ¹	0,44	0,40	0,24	0,08	1,39	54,7	1,333	5,23	0,90
H+Al ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	140	4,24	3,81	2,02	1,55	10,91	47,6	1,20	4,15	0,88
S ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	140	1,8	1,8	0,93	0,4	5,3	50,2	1,10	4,68	0,92
T ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	140	6,1	5,9	1,86	2,8	11,6	30,5	0,82	3,73	0,94
V (%)	140	32,0	29,9	15,74	5,6	73	49,1	0,56	2,75	0,95
Silte (g kg^{-1})	140	11,5	11,2	2,94	4,4	22,3	25,6	0,41	4,34	0,97*
Areia (g kg^{-1})	140	75,3	75,5	5,23	61,8	88,0	6,9	-0,06	2,9	0,98**
Argila (g kg^{-1})	140	13,2	12,7	4,13	5,7	25,1	31,3	0,79	3,34	0,94

1 - dados sem "outliers".

* Significativo ao nível de 5%.

** Significativo ao nível de 1%.

A brusca redução da amplitude total pela retirada de valores considerados como "outliers" vem corroborar a afirmação de Toledo & Ovalle (1982) de que a amplitude total, por levar em conta apenas os valores extremos de um conjunto de dados, apresenta grande instabilidade, sendo muitas vezes afetada de forma bastante acentuada pela ocorrência de apenas um valor particularmente "anormal".

É importante observar também que a retirada de "outliers" não implicou em grandes mudanças na amplitude total para os demais parâmetros que tiveram valores considerados como "outliers", no caso, pH, Ca e valor S superficial e Mg superficial e subsuperficial.

Os valores dos coeficientes de variação dos atributos de solo apresentam grande variação (Tabelas 5 e 6), desde 6,0% para a areia superficial a 130,4% para o P subsuperficial. Considerando a classificação de Warrick & Nielsen (1980), apenas as variáveis pH e areia tiveram coeficiente de variação considerado baixo. A grande maioria das variáveis tiveram C.V. classificados como médios. P e K nas camadas superficial e subsuperficial tiveram C.V. mais elevados. Isso significa que essas variáveis foram as que apresentaram maior variabilidade dentre as estudadas. A explicação para valores tão elevados de C.V. é a aplicação desses fertilizantes em linhas e mecanicamente, ao efeito residual de adubações e à exposição, pela erosão, de camadas mais pobres nesses elementos.

Quando se analisam os dados pelos dos coeficientes de assimetria e de curtose, utilizando-se a Tabela 1 de Jones (1969) para um nível de significância de 5%, observa-se que a grande maioria dos parâmetros estudados apresentam distribuição não normal, principalmente na camada superficial, que é a mais sujeita aos processos antrópicos e à maior variabilidade, devido à erosão, mecanização e adubação.

A aplicação do teste W (Shapiro-Wilk) mostrou normalidade dos dados apenas para silte e areia nas camadas superficial e subsuperficial e para matéria orgânica na camada superficial, o que confirma os resultados das medidas de posição, dispersão e os coeficientes de assimetria e de curtose.

As medidas de posição foram mais similares, apontando para uma distribuição normal dos dados, enquanto que as de dispersão apontam para uma distribuição não normal. Esse fato é devido, provavelmente, ao intenso processo erosivo e, em alguns casos, ao processo de manejo, mobilização e adubação do solo. Daí, a necessidade de se usar vários parâmetros de estatística descritiva para caracterizar a distribuição de frequência de um conjunto de dados (Libardi et al., 1996).

4.1.3. "Outliers"

A análise preliminar dos dados para conhecerem-se valores considerados como "outliers", usando-se os critérios "outlier" $> (\bar{X} + 4\sigma)$ e "outlier" $< (\bar{X} - 4\sigma)$ (Cahn et al., 1994), mostrou que os atributos P superficial e subsuperficial, pH e Mg superficiais, apresentam no máximo 2 valores considerados "outliers"; K subsuperficial e superficial, Ca e valor S superficiais, Mg subsuperficial e MS e ALTPL apresentam apenas um valor "outlier", observando-se, por outro lado, que, em nenhum atributo, os "outliers" representaram mais de 1,5% dos dados. Ressalte-se que os "outliers" estiveram mais presentes na camada superficial devido, provavelmente, ao fato dessa camada sofrer maior ação antrópica, o que provoca maior variabilidade dos atributos do solo.

A retirada de "outlier" dos conjuntos de dados de P e de K afetou mais intensamente as medidas de dispersão, principalmente amplitude total. Em alguns casos, como por exemplo, pH, Ca e Mg, não houve grandes modificações quando da retirada desses valores. Daí a importância de analisarem-se vários parâmetros da estatística descritiva para, então, caracterizar o comportamento de um conjunto de dados.

4.2. Correlação, regressão linear e regressão multivariada dos atributos do solo com os da crotalária

A correlação entre os atributos de solo e de planta está na Tabela 7. De modo geral, todos os atributos de solo tiveram uma correlação significativa com a produção de matéria seca e altura da crotalária, com exceção do K e do Mg nas camadas subsuperficial e superficial e o valor S na camada superficial. Os parâmetros que apresentaram as melhores correlações foram os relacionados com H+Al tanto superficial quanto subsuperficial (o próprio H+Al, NC, os valores de T, V% e pH), a argila e o P, todos ao nível de significância de 1%. A espessura do solo e a matéria orgânica subsuperficial e superficial apresentaram correlações menores: 0,26, 0,21 e 0,19 respectivamente. A ES > 60 cm representava mais de 72% da área, e isso, provavelmente, explique a baixa correlação da ES com a MS. A baixa correlação da MO com MS pode ser devida à fixação biológica que compensa a deficiência de N do solo. Wini et al., (1994) encontraram que a fixação biológica pode ser usada como fonte exclusiva de N para a produção de cevada sob condição de baixa fertilidade do solo sem sacrificar a produtividade nem a qualidade do solo.

Esses resultados diferiram dos encontrados por Sessay & Stocking (1995), que obtiveram maior correlação com a espessura do solo, devido ao fato de terem trabalhado com a espessura máxima do solo, ou seja, a soma da espessura dos horizontes A e B, de 52 cm.

Tabela 7. Correlação da produção de matéria seca e da altura da crotalária com parâmetros de solo

Atributos	Matéria seca	Altura de planta
Matéria seca	1,00	0,84**
Altura de planta	0,84**	1,00
Necessidade de calagem - superf ¹ .	-0,55**	-0,54**
H+Al - superf.	-0,52**	-0,53**
Necessidade de calagem - subsup ² .	-0,48**	-0,54**
H+Al - subsup.	-0,48**	-0,54**
V - subsup.	0,44**	0,47**
Argila - subsup.	-0,42**	-0,44**
T - superf.	-0,42**	-0,45**
V - superf.	0,40**	0,36**
Argila - superf.	-0,40**	-0,41**
T - subsup.	-0,40**	-0,45**
Ca - subsup.	0,36**	0,36**
P - superf.	0,33**	0,41**
P - subsup.	0,33**	0,41**
S - subsup.	0,32**	0,32**
pH - subsup.	0,32**	0,39**
Silte - subsup.	0,30**	0,22**
Silte - superf.	0,28**	0,08
Espessura do solo	0,26*	0,28**
MO - subsup.	0,21*	0,18*
pH - superf.	0,20*	0,212*
MO - superf.	0,19*	0,18*
Ca - superf.	0,17*	0,12
Areia - subsup.	0,17*	0,23
K - subsup.	-0,16	-0,14
Areia - superf.	0,11	0,29**
S - superf.	0,10	0,07
Mg - subsup.	0,10	0,11
K - superf.	-0,05	-0,06
Mg - superf.	-0,02	-0,77

1 - superficial (0 - 20 cm)

2 - subsuperficial (20 - 40 cm)

* significância ao nível de 5%.

** significância ao nível de 1%.

Os atributos do solo Ca, pH e valor S da camada subsuperficial tiveram com os atributos de planta uma correlação maior do que os da camada superficial, devido, provavelmente, ao início da reação da calagem, que foi realizada antes do plantio.

Os resultados das regressões lineares entre cada atributo de solo e os de plantas estão na Tabela 8. Esses dados mostram que a produtividade e a altura da crotalária respondem linearmente aos atributos do solo ao nível de significância de 5% e até 1%. Neste caso, também os melhores coeficientes de determinação (R^2) foram de atributos relacionados com H+Al e de argila. O efeito do H+Al está relacionado com o teor de Al, que tem implicações negativas no desenvolvimento do sistema radicular, principalmente com relação à absorção de nutrientes e de água (Olmos & Camargo, 1976 e Ricthey et al., 1980). A relação negativa do teor de argila com MS pode ser explicada pelo fato de que, nesse solo, o teor de argila aumenta com a profundidade e, portanto, o aumento do teor de argila reflete a ação da erosão que reduz a profundidade de enraizamento, a disponibilidade de água e expõe as camadas mais pobres em nutrientes e mais ricas em Al.

A aplicação da regressão multivariada pelo procedimento passo a passo para selecionar a combinação de variáveis independentes mais importantes na produção de matéria seca da crotalária resultou nas equações da Tabela 9. Observe-se que, para esse estudo, foram retirados os atributos valor T, S e V por terem uma estreita relação com o H+Al. Os resultados mostram que, das 22 variáveis estudadas, apenas 4 tiveram participação significativa na expressão final da equação multivariada (H+Al e argila superficiais, silte subsuperficial e ES). O H+Al superficial foi o atributo mais importante, respondendo por 28% da variação da produção de matéria seca da crotalária, o que já tinha sido demonstrado pelos estudos de correlação e de regressão linear. Com a adição de outros atributos a regressão multivariada explicou 43% da variação da produtividade da cultura.

Tabela 8. Regressão linear de atributos de solo¹ com a produção de matéria seca e altura da crotalária juncea

	Matéria seca		Altura de planta	
	Y=	R ²	Y=	R ²
H+Al - superf.	12,46-1,14 x**	0,29	2,95-0,124 X**	0,33
Necessidade de calagem - superficial	11,44-1,51 X**	0,28	2,83-0,16 X**	0,30
H+Al - subsup.	10,83-0,61 X**	0,20	2,82-0,078 X**	0,30
Necessidade de calagem - subsuperficial	10,20-0,809 X**	0,20	2,74-0,103 X**	0,31
T - superf.	12,93-0,87 X**	0,20	3,05-0,105 X**	0,27
Argila - superf.	12,07-0,342 X**	0,20	2,865-0,033 X**	0,18
V - subsup.	6,01+0,07 X**	0,15	2,22+0,008 X**	0,22
Argila - subsup.	11,65-0,26 X**	0,14	2,876-0,029 X**	0,18
T - subsup.	11,53-0,54 X**	0,13	2,92-0,071 X**	0,21
V - superf.	5,86+0,077 X**	0,12	2,28+0,007 X**	0,09
Espessura do solo.	6,17+6,17 X**	0,09	2,27+0,003 X**	0,10
Ca - subsup.	6,79+1,101 X**	0,08	2,32+0,131 X**	0,11
pH - subsup.	-2,02+2,34 X**	0,07	1,09+0,32 X**	0,12
S - subsup.	6,92+0,72 X**	0,06	2,33+0,085 X**	0,08
P - superf.	7,51+0,091 X**	0,06	2,40+0,011 X**	0,07
Silte - subsup.	5,83+0,209 X**	0,05	2,25+0,021 X**	0,05
MO - subsup.	6,74+1,60 X*	0,03	2,36+0,14 X**	0,03
Areia - superf.			1,18+0,016 X**	0,07
Areia - subsup.			1,636+0,011 X*	0,04
P - superf.			2,45+0,009 X*	0,03
pH - superf.			1,791+0,162 X*	0,03

1 - São apresentados apenas os atributos que tiveram significância a 1 ou 5%.

**significância ao nível de 1%.

* significância ao nível de 5%.

Esse resultado difere dos encontrados por Sessay & Stocking (1995), que encontraram um peso muito maior para a espessura do solo, o K e a densidade do solo. Isso justifica a necessidade de maior intensidade de pesquisa para conhecerem-se melhor os parâmetros que interferem na produção das culturas, principalmente considerando as condições específicas deste trabalho.

Tabela 9. Modelos de regressão multivariada da produção de matéria seca da crotalária e atributos do solo

Nº de variáveis	Equação de regressão Y =	R ²
1	12,46 - 1,14 H+Al2	0,28
2	9,70 - 1,19 H+Al2 - 0,26silt4	0,36
3	11,34 - 0,99 H+Al2 +0,22 silt4 - 0,184arg2	0,40
4	9,43 - 0,88 H+Al2 + 0,01 ES - 0,17 arg2 + 0,25 silt4	0,43

Onde: H+Al2 = H+Al superficial; Silt4 = Silte subsuperficial;
Arg2 = argila superficial; ES = espessura do solo

4.3. Dependência espacial de atributos de crotalária e de solo

O comportamento espacial dos atributos da crotalária e do solo foi avaliado, utilizando-se os semivariogramas escalonados, que proporcionam um melhor resumo dos resultados e facilitam a comparação dos diferentes semivariogramas. A análise desses mostrou que todas as variáveis estudadas apresentaram dependência espacial (Figuras 3, 4, 5 e 6 e Apêndice 1), exceto as variáveis P e K subsuperficiais. Nesse caso, há indicação clara de que estas variáveis são independentes espacialmente, apresentam

distribuição aleatória, ou que o espaçamento de amostragem usado foi maior do que o necessário para revelar a dependência espacial.

Todos os semivariogramas construídos se ajustaram bem ao modelo esférico, com exceção do de areia superficial, que se ajustou melhor ao modelo Gaussiano. Vários pesquisadores (Trangmar et al., 1987; Souza, 1992; Cambardella et al., 1994; Salviano et al., 1995; Paz et al., 1996) encontraram o modelo esférico como o mais adaptado para descrever o comportamento de semivariogramas de atributos de plantas e de solos.

O efeito pepita, que é um parâmetro importante do semivariograma, reflete um erro analítico, indicando uma variabilidade não explicada, que pode ser devida tanto a erros de medidas ou microvariação não detectada em função da distância de amostragem utilizada (Cambardella, 1994; Paz et al., 1996), sendo impossível quantificar a contribuição individual dos erros de medições ou da variabilidade (Arzeno, 1990). Esse parâmetro pode ser expresso como porcentagem do patamar com o objetivo de facilitar a comparação do grau de dependência espacial das variáveis em estudo (Trangmar et al., 1985). Para a análise do grau de dependência espacial das variáveis em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), onde são considerados de forte dependência espacial os semivariogramas que têm um efeito pepita $\leq 25\%$ do patamar, moderada dependência espacial quando o efeito pepita está entre 25 e 75% e de fraca dependência quando o efeito pepita é $> 75\%$.

A análise do efeito pepita dos atributos da crotalária mostra que os semivariogramas destes são de forte dependência espacial (Figura 3). Como a planta é a expressão das variáveis de solo, essa forte dependência espacial deve ser associada a variações intrínsecas do conjunto de características do solo.

Esf. $(C_0; C_1; a)$ é o modelo esférico ajustado; C_0 = efeito pepita; C_1 = patamar - C_0 ; a = alcance e cuja a equação é:

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

$$\gamma(h) = 1,0 \text{ quando } h \geq a$$

Gau $(C_0; C_1)$ é o modelo Gaussiano ajustado; C_0 = efeito pepita; C_1 = patamar - C_0

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-h / a_0)^2] \quad \text{onde } a_0 = (1/\sqrt{3}) a$$

Figura 3. Semivariogramas escalonados de atributos de planta e de frações granulométricas.

$Esf. (Co;C_1;a)$ é o modelo esférico ajustado; Co = efeito pepita; C_1 = patamar - Co ; a = alcance e cuja a equação é:

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

$$\gamma(h) = 1,0 \quad \text{quando } h \geq a$$

Figura 4. Semivariogramas escalonados de espessura de solo, necessidade de calagem, fósforo e matéria orgânica

Esf. $(C_0; C_1; a)$ é o modelo esférico ajustado; C_0 = efeito pepita; C_1 = patamar - C_0 ; a = alcance e cuja a equação é:

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

$$\gamma(h) = 1,0 \quad \text{quando } h \geq a$$

Figura 5. Semivariogramas escalonados de K, Ca, Mg e H+Al do solo

Esf. $(C_0; C_1; a)$ é o modelo esférico ajustado; C_0 = efeito pepita; C_1 = Patamar - C_0 ; a = alcance e cuja a equação é:

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

$$\gamma(h) = 1,0 \text{ quando } h \geq a$$

Figura 6. Semivariogramas escalonados de pH, CTC, Soma de bases e saturação por bases do solo

A espessura do solo apresenta uma forte dependência espacial (Figura 4), devido à variação intrínseca nas características do solo, principalmente as ligadas à suscetibilidade à erosão. Os semivariogramas de atributos químicos de solos são, na sua grande maioria, classificados como de moderada dependência espacial. As variáveis matéria orgânica subsuperficial e superficial e a capacidade de troca de cátions apresentaram semivariogramas de forte dependência espacial, devido a características intrínsecas do solo (Cambardella et al., 1994). Potássio superficial foi o único que apresentou fraca dependência espacial. É importante observar que o fósforo superficial apresentou um valor de efeito pepita no limite superior para ser considerado como de moderada dependência e que o potássio e fósforo subsuperficial apresentaram efeito pepita puro, ou seja, semivariograma sem estrutura definida. A justificativa para este fato é que essa área recebe adubação desses dois nutrientes há muito tempo, o que vem corroborar o que dizem Cambardella et al. (1994), de que a fraca dependência espacial é devida a variações extrínsecas como aplicação de fertilizantes e preparo do solo. Ressaltam, ainda, que uma variável que tenha fraca dependência espacial pode apresentar melhor estrutura espacial, se fosse adotado um menor espaçamento de amostragem.

A análise do efeito pepita dos atributos de textura do solo mostrou que somente a argila apresentou forte dependência espacial. Observe-se que o solo em estudo apresenta um gradiente textural e que existe uma variação de espessura de solo devido ao processo de erosão. As demais variáveis apresentaram moderada dependência espacial.

O alcance de dependência espacial é outro parâmetro importante no estudo do semivariograma e significa a distância máxima que uma variável está correlacionada espacialmente. Os valores de alcance variaram de 12 m para o

fósforo superficial a 42 m para a areia superficial (Figuras 3, 4, 5, e 6 e Apêndice 1). Os atributos de crotalaria apresentaram uma similaridade de alcance, 25 e 32 m para altura de planta e produção de matéria seca respectivamente. Os atributos de textura apresentaram os maiores alcances e variaram de 32 m para o silte subsuperficial a 42 m para a areia superficial. Os atributos químicos de solo apresentaram variações de 12 m para o fósforo a 32 m para o valor T superficial e subsuperficial e Mg superficial.

As análises, por profundidade, dos semivariogramas das variáveis mostrou que esses tiveram um comportamento muito similar, com respeito ao modelo matemático, alcance e efeito pepita. Apenas a areia apresentou diferente modelo de semivariograma na camada subsuperficial — modelo esférico e superficial — modelo Gaussiano. As variáveis relacionadas com o H+Al (o próprio H+Al, NC, saturação por bases) e o silte tiveram praticamente os mesmos valores de efeito pepita e alcance.

4.4. Mapeamento

Os mapas de distribuição espacial das classes de produtividade de matéria seca da crotalaria e de espessura do solo encontram-se na Figura 7 e os de teores de fósforo e de necessidade de calagem são mostrados na Figura 8. Os percentuais de classes variaram de 4% para a classe MR de espessura do solo a 48,8% para a classe MB da mesma variável (Apêndice 2).

O mapa de produção de matéria seca segue um padrão bastante definido (Figura 7). As porcentagens das áreas por classes variaram de 12,2 a 33,8% (Apêndice 2) e foram concentradas por região que se definiu como zona de manejo. É possível, de posse desse mapa, recomendar estratégias

específicas para cada zona de manejo, aumentando a eficiência do uso de fertilizantes, reduzindo o potencial de fontes não pontuais de poluente e possibilitando maior produtividade.

Observe-se na Figura 7^a, que as classes de produtividade MB e B concentram-se na parte superior da paisagem, enquanto que as classes R e MR estão na parte inferior do lançante, devido a problemas ligados com a erosão do solo. Com isso, as áreas de cotas mais baixas não proporcionam um bom desenvolvimento da cultura e, conseqüentemente, não podem dar uma boa proteção ao solo, criando-se, assim, um círculo vicioso que tende a aumentar a suscetibilidade à erosão nessas regiões.

A espessura do solo predominante é superior a 60 cm (Figura 7b), representada pelas classes MB e B, que correspondem a mais de 73% da área total (Apêndice 2). O mapeamento permite localizar os sulcos de erosão que estão retratados pelas classes R e MR, com bastante precisão, totalizando 11,8% da área. A zona de manejo representada pela espessura menor que 20 cm totaliza apenas 4,1% da superfície, o que aparentemente tem pouca expressividade, não fossem os problemas ligados à mecanização e favorecimento ao processo de erosão.

O mapa de fósforo no solo (Figura 8a) mostra que é possível dividir a área em zonas de manejo para fins de adubação fosfatada. As classes de teores de fósforo encontram-se bastante concentradas, com as classes MB e B na parte superior da paisagem e as classes R e MR na parte inferior, o que permite dividir a área em zonas de manejo para fins de adubação fosfatada, embora apareçam algumas inclusões nas mesmas.

(a)

(b)

OBS: MB = condição muito boa; B = boa; M = média; R = ruim e MR = muito ruim

Figura 7. Mapas das variáveis produção de matéria seca (a) e espessura do solo (b)

(a)

(b)

OBS: MB = condição muito boa; B = boa; M = média; R = ruim e MR = muito ruim

Figura 8. Mapas das variáveis fósforo no solo (a) e necessidade de calagem superficial (b)

O uso de recomendação média de fertilizantes proporcionaria a superfertilização em 34% da área e a subfertilização em 42%. A aplicação de fertilizantes "onde é necessária" maximiza benefícios (Borgelt et al., 1994), principalmente para o meio ambiente (Schueller, 1992).

A redução de custos com a aplicação localizada de fertilizantes por zonas de manejo requer o emprego de três estratégias: 1) dividir o campo em zonas de manejo, considerando a redução da variabilidade do solo; 2) usar tecnologia que possibilita o aumento de eficiência total do insumo; e 3) aplicar níveis de insumos variáveis por zona de manejo, favorecendo a otimização da produtividade e que seja mínima a quantidade de insumo requerido por zona de manejo (Cassman & Plant, 1992). Os autores chamam a atenção para os aspectos das funções de respostas das culturas à aplicação de fertilizantes. A aplicação de níveis variáveis de adubos por zona de manejo, depende de algumas considerações práticas como tamanho da área, forma de distribuição e tipo de distribuidor de fertilizantes (Han et al., 1994).

O mapeamento da necessidade de calagem (Figura 8b) mostra que o uso de calcário baseado em recomendação média implicaria em supercalagem de 48% da área e em subcalagem de 20% da área. É importante observar que os estudos de correlação e de regressão discutidos neste trabalho, mostraram uma forte dependência da cultura em estudo, a crotalária, a parâmetros correlacionados com H+Al (o próprio H+Al, NC e valor V). A supercalagem tem reflexo direto nos custos de produção; já a subcalagem pode refletir em baixa eficiência do uso de fertilizantes.

4.5. Distribuição espacial da produção de matéria seca da crotalária em comparação com altura de planta e com parâmetros de solo

4.5.1 Comparação de índices

Os índices de performance das matrizes de erros de MS com ALTPL e com parâmetros de solo se encontram na Tabela 10, e as matrizes de erros que serviram para os cálculos estão no Apêndice 3. De modo geral, esses índices apresentaram uma boa similaridade de resposta. As amplitudes variaram de 56% para a concordância global, 68% para a concordância associada e 63% para a estatística "Kappa". O índice de concordância associada apresentou alguma discrepância dos outros índices, como no caso da matriz de erros de MS com argila subsuperficial (Tabela 12d), devido, basicamente, a um único dado associando à classe B de MS com a classe MB de argila subsuperficial que é considerado concordante associado, mas para os outros índices esse dado é considerado discrepante.

A estatística "Kappa", pela própria definição, pode variar de valor negativo até "um", onde o valor negativo expressa total independência entre os atributos e "um" significa total concordância (Ortiz, 1993). Landis & Kock (1977) apresentaram uma classificação qualitativa para a estatística "Kappa" (Tabela 11). Sugeriu-se uma faixa menos rigorosa para a classificação qualitativa da estatística "Kappa" (Tabela 11), para o caso de estudo de superposição de mapas associando parâmetros de planta e de solo, considerando que a planta pode atuar como um fator de ajuste da variabilidade do solo (Trangmar et al., 1987, Souza, 1992 e Camelo et al., 1993/94) e analisando o resultado obtido com a superposição de MS e ALTPL (Figura 9a e Tabela 12a).

Tabela 10. Índices de performance das matrizes de erros dos dados de produção de matéria seca de crotalária com altura de plantas e com parâmetros de solo

Parâmetros	Concordância global	Concordância associada	Estatística Kappa (%)
Altura de planta	0,64	0,99	0,55
Necessidade de calagem - superf ¹ .	0,56	0,96	0,44
H+Al - superf.	0,49	0,91	0,36
Necessidade de Calagem - subsup ² .	0,43	0,90	0,29
H+Al - subsup.	0,41	0,87	0,26
V - subsup.	0,35	0,80	0,20
P - superf.	0,34	0,77	0,19
Argila - superf.	0,33	0,80	0,17
V - superf.	0,32	0,76	0,17
Argila - subsup.	0,32	0,87	0,15
MO - subsup.	0,30	0,70	0,15
MO - superf.	0,28	0,68	0,12
Silte - subsup.	0,27	0,71	0,09
Areia - subsup.	0,26	0,71	0,09
Ca - subsup.	0,25	0,70	0,10
pH - superf.	0,25	0,67	0,09
pH - subsup.	0,24	0,71	0,08
Areia - superf.	0,24	0,69	0,06
Espessura do solo	0,24	0,67	0,06
Ca - superf.	0,22	0,58	0,05
S - superf.	0,20	0,54	0,03
Mg - superf.	0,19	0,50	0,02
S - subsup.	0,19	0,65	0,01
Silte - superf.	0,16	0,58	-0,02
T - superf.	0,12	0,37	-0,04
Mg - subsup.	0,10	0,46	-0,09
T - subsup.	0,08	0,31	-0,09

1 - superficial (0 - 20 cm)

2 - subsuperficial (20 - 40 cm)

Tabela 11. Classificação da estatística "Kappa"

QUALIDADE	FAIXA DE LANDIS & KOCH (1977)	FAIXA SUGERIDA
PÉSSIMA	$< 0,0$	$< 0,0$
RUIM	$0,0 - 0,2$	$0,0 - < 0,15$
RAZOÁVEL	$0,2 - 0,4$	$0,15 - < 0,30$
BOA	$0,4 - 0,6$	$0,30 - < 0,45$
MUITO BOA	$0,6 - 0,8$	$0,45 - < 0,60$
EXCELENTE	$0,8 - 1,0$	$\geq 0,60$

4.5.2. Superposição de mapas de produção de matéria seca da crotalária com o de altura de planta e com o de parâmetros do solo

A superposição de mapas da MS e ALTPL (Figura 9a) mostra que estas variáveis tiveram uma concordância associada espacial muito boa. A análise da matriz de erros referente a esses atributos (Tabela 12a) revela que existe menos de 1% de área considerada divergente. Os outros índices de performance (Tabela 10) de matriz de erros mostraram valores muito elevados: 0,64 para a concordância global e 0,55 para a estatística "Kappa". Este resultado, de certa forma, já era esperado, devido à estreita relação entre altura de planta e produção de matéria seca e principalmente porque a correlação destas variáveis foi alta (Tabela 7).

A distribuição espacial de MS com os parâmetros de solo, segundo a classificação sugerida (Tabela 11), variou de boa para as variáveis NC e H+Al - superficial a péssima para silte e magnésio - superficiais e valor T superficial e subsuperficial.

Tabela 12. Matrizes de erros de produção de matéria seca (MS) com altura de planta, espessura de solo e valor T superficial e subsuperficial.

(a)

			Altura de planta				
			MB	B	M	R	MR
MS			(16.7)	(28.3)	(19.5)	(17.1)	(18.4)
	MB	(12.2)	9.2	3			
	B	(33.8)	7.3	20.8	5.4	0.3	
	M	(20.9)	0.2	4.4	11.1	5	0.3
	R	(15.5)		0.1	3	8.5	3.9
	MR	(17.6)			0.1	3.4	14.2

(b)

			Espessura do solo				
			MB	B	M	R	MR
MS			(48,8)	(23,7)	(15,7)	(7,7)	(4,1)
	MB	(12.2)	6,4	5,4	0,3		
	B	(33.8)	21,2	8,8	3,3	0,4	0,1
	M	(20.9)	9,8	3,8	5,1	1,6	0,7
	R	(15.5)	6,8	2,9	2,8	1,5	1,4
	MR	(17.6)	4,6	2,8	4,2	4.2	1,9

(c)

			T superficial				
			MB	B	M	R	MR
MS			(20.5)	(14.9)	(25)	(18.3)	(21.4)
	MB	(12.2)	0.1	1	4.5	3.4	3.1
	B	(33.8)	0.4	3.3	10.5	6.1	13.6
	M	(20.9)	2.7	3.5	5.5	5.4	3.8
	R	(15.5)	4	4	3.4	3.3	0.8
	MR	(17.6)	13.2	3.2	1.1	0.1	0.1

(d)

			T subsuperficial				
			MB	B	M	R	MR
MS			(31.6)	(20.5)	(16.7)	(11.8)	(19.4)
	MB	(12.2)	1.5	1	2.9	1.5	5.2
	B	(33.8)	4.2	3.1	8.5	6.9	11.2
	M	(20.9)	8.3	3.3	3.7	3.4	2.2
	R	(15.5)	10.2	3.2	1.4		0.7
	MR	(17.6)	7.4	9.9	0.3		

MB = muito boa; B = boa; M = média; R = ruim; MR = muito ruim

(a)

(b)

MB*
 B*
 M*
 R*
 MR*
 X

Obs: MB* = produtividade mais alta associada à condição muito boa e boa do atributo; B* = alta ass. a muito boa, boa e média; M* = média ass. a boa, média e ruim; R* = baixa ass. a média, ruim e muito ruim e MR* = muito baixa ass. a ruim e muito ruim. X = alta ass. às classes ruim e muito ruim do atributo ou vice-versa.

Figura 9 - Mapas de superposição de produção de matéria seca da crotalária com altura de planta (a) e necessidade de calagem no solo (b)

(a)

(b)

Obs: MB* = produtividade mais alta associada à condição muito boa e boa do atributo; B* = alta ass. a muito boa, boa e média; M* = média ass. a boa, média e ruim; R* = baixa ass. a média, ruim e muito ruim e MR* = muito baixa ass. a ruim e muito ruim. X = alta ass. às classes ruim e muito ruim do atributo ou vice-versa.

Figura 10. Mapas de superposição de produção de matéria seca da crotalária com H+Al (a) e fósforo no solo (b).

As concordâncias associadas para MS com NC e H+Al superficial (Figuras 9b e 10a) foram superiores a 90%. Para um trabalho que envolveu um mosaico de 3036 pontos com área unitária de um metro quadrado e considerando a capacidade da planta de atuar como fator de diluição de variabilidade, tem-se uma demonstração da validade da faixa de classificação sugerida.

A análise mais detalhada das matrizes de erros de MS com valor T (Tabelas 12c e 12d) denuncia que houve uma relação espacial negativa entre essas variáveis, ou seja, alta produção de matéria seca da crotalária estava associada a baixo valor de T e vice-versa. A explicação para este fato é que o H+Al tem um peso muito grande no cálculo do valor de T. O valor médio de H+Al representa aproximadamente 70% do valor médio de T (Tabela 5).

As variáveis que apresentaram maiores índices de concordância espacial com MS foram H+Al e NC superficial e subsuperficial (Tabela 10). Observe-se que se estudou a relação inversa dessas variáveis com a produção de matéria seca da crotalária. Este resultado revela que a produção da matéria seca da crotalária foi relacionada negativamente com o Al desse solo. O Al atua como fator inibidor do desenvolvimento radicular, com conseqüentes efeitos negativos na absorção de água e de nutrientes pelas plantas (Olmos & Camargo, 1976; Ritchey et al., 1980 e Sanchez, 1981). Trangmar et al. (1987) encontraram boa correlação espacial entre produtividade de arroz e a saturação de Al. A NC foi calculada a partir do valor de saturação por bases e capacidade de troca de cátions e isso explica a melhor performance desse índice quando comparado com a variável H+Al.

A matriz de erros de MS com argila subsuperficial apresenta uma concordância associada de 87% (Apêndice 7), só superada por H+Al e NC. Ressalte-se que essa relação é

negativa; isso vem corroborar os dados de correlação (Tabela 7), onde H+Al apresenta alta correlação negativa com MS. O teor de argila, nesse solo, aumenta com a profundidade e, portanto, o aumento de argila na camada amostrada significa que está em curso o processo de erosão, refletindo-se, por sua vez, o menor rendimento da cultura.

A espessura de solo e os teores de matéria orgânica não apresentaram boa concordância com a MS. A análise da matriz de erros de MS com ES (Tabela 12b) mostrou que apenas nas classes M, R e MR, ES < 60 cm deu-se uma concordância maior, devido à erosão expor as camadas mais pobres em nutrientes e mais ricas em elementos tóxicos, como Al, além de reduzir a profundidade de enraizamento.

As matrizes de erros de MS com MO superficial e subsuperficial (Apêndice 4) apresentaram concordâncias muito baixas, refletindo que a crotalária pode suprir sua necessidade de N pelo processo de fixação biológica. Isso aponta para a possibilidade da crotalária ser uma cultura indicada para recuperar áreas degradadas.

4.6. Produção de matéria seca da crotalária e espessura do solo

As médias de MS pelo agrupamento de ES estão na Tabela 13. A média de MS relativa à espessura de 0-20 cm é 65% da maior produtividade. Esses pontos são os que sofreram mais intensamente a ação do processo erosivo e esses pontos representam os sulcos de erosão da área (Figura 7b). A menor produtividade dessa área está associada a pouco volume de solo explorado pelas raízes, exposição de elementos tóxicos e arraste das plantas pela enxurrada. A espessura de solo de 20 a 60 cm apresentou rendimento de cerca de 81% do maior

valor. As $ES > 60$ cm não apresentaram diferenças aparentes entre si.

A aplicação do teste de comparação de médias (Tukey ao nível de 5%) mostrou que apenas $ES \leq 20$ cm diferiram significativamente. Mokma & Siltz (1992), trabalhando com milho, também encontraram diferença significativa apenas sob a condição de erosão severa. Os autores associaram a redução de produtividade com a umidade do solo.

O ajuste dos dados de MS versus ES a uma regressão quadrática (Figura 11) sugere que a MS foi diretamente relacionada com a ES até 60 cm. A partir daí, a ES parece não interferir na produção de matéria seca da crotalária. Monreal et al. (1995), Sessay & Stocking (1995) e Albuquerque et al. (1996) também encontraram uma relação direta da ES com a produtividade de culturas. Para Monreal et al. (1995), a perda de um centímetro de ES representava a redução de produtividade em 107 kg ha^{-1} de trigo. Albuquerque et al. (1996) encontraram um decréscimo de $42,9 \text{ kg ha}^{-1}$ de milho para cada centímetro de espessura de solo removido pela erosão.

O estudo de matriz de erros relacionando MS e ES (Tabela 12b), embora apresente um índice classificado como ruim, revela uma particularidade de concentração de coincidência entre as classes M, R e MR de MS com as M, R e MR de ES, ou seja, a espessura do solo tem um efeito direto na produção de matéria seca da crotalária quando esta é menor que 60 cm. No sentido prático, isso significa que a erosão, quando o solo ainda tem uma espessura superior a 60 cm representa a perda de nutrientes. Nesses casos, a adição de fertilizantes pode compensar a perda de parte ou de toda a camada superficial (Lal, 1985), mas provoca a degradação do ambiente que, dependendo da intensidade, pode poluir e assorear as áreas mais baixas, dentro ou fora da área erodida.

Tabela 13. Produção de matéria seca da crotalária por agrupamento de espessura do solo

Espessura do solo (m)	Produção de matéria seca da crotalária (Mg ha ⁻¹)
0,00 - 0,20	5,787 a
0,20 - 0,40	7,296 b
0,40 - 0,60	7,235 b
0,60 - 0,80	8,594 b
0,80 - 1,00	8,797 b
1,00 - 1,20	8,353 b

Figura 11. Efeito da espessura do solo na produção de matéria seca da crotalária.

5. CONCLUSÕES

A análise descritiva dos atributos de crotalária e de solo mostrou que as medidas de posição foram mais similares, apontando para uma distribuição normal, com exceção de P e K, enquanto que as medidas de dispersão apontam para uma distribuição não normal. Os coeficientes de variação dos atributos foram classificados como baixo ou médio, com exceção dos de P e K. Com exceção do P subsuperficial e do K superficial e subsuperficial, todos os atributos apresentaram dependência espacial.

O mapeamento dos atributos usando a técnica de krigagem permitiu dividir a área em cinco classes de menor variabilidade — zonas de manejo. Estas zonas de manejo permitiram entender melhor os efeitos da erosão sobre a produtividade da crotalária. O manejo estratégico dessa zona permite reduzir os custos de produção e, principalmente, obter um ambiente mais saudável na exploração agrícola.

Os parâmetros derivados do H+Al foram os que tiveram as mais estreitas relações com a produção de matéria seca da crotalária, destacando-se a necessidade de calagem.

A espessura do solo > 60 cm não afetou diretamente a produção de matéria seca da crotalária, mas, quando essa era < 20 cm, afetou-a fortemente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AINA, P. O; EGOLUN, E. Effect of cattle feedlot manure and inorganic fertilizer on the improvement of subsoil productivity of two soils. **Soil Science**, v.129, n.4, p.212-217, 1980.
- ALBURQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; FIORIN, J. E. Variabilidade de solo e planta em Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, n.1, p.151-157, 1996.
- ARZENO, J. L. Avaliação física de diferentes manejos de solo em um Latossolo Roxo Distrófico. (Piracicaba-SP). Piracicaba, 1990. 259p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- BALL, S. T.; MULLA, D. J.; KONZAK, C. F. Spatial heterogeneity affects variety trial interpretation. **Crop Science**, v.33, p.931-935, 1993.
- BHATTI, A. U.; MULLA, D. J.; FRAZIER, B. E. Estimation of soil properties and wheat yields on complex eroded hills using geostatistics and thematic mapper images. **Remote Sensing Environment**, v. 37, p. 181-191, 1991a.
- BHATTI, A. U.; MULLA, D. J.; KOEHLER, F. E.; GURMUNI, A. H. Identifying and removing spatial correlation from yield experiments. **Soil Science Society of America Journal**, v. 55, n.6, p.1523-1528, 1991b.

- BORGELT, S. C.; SEARCY, S. W.; STOUT, B. A.; MULLA, D. J. Spatially variable liming rates: a method for determination. **Transactions of the ASAE**, v.37, n.5, p.1499-1507, 1994.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Serviço Nacional de Pesquisa Agropecuária. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo**. Brasilia, 1960. 634p. (Boletim, 12)
- CAHN, M. D.; HUMMEL, J. W.; BROUER, B. H. Spatial analysis of fertility for site-specific crop management. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1240-1248. 1994.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1501-1511, 1994.
- CAMELO, L. G. L.; SIERRA, J.; FUMAGALLI, C.; MIGUEZ, S. R. Variabilidad espacial de fosforo en suelo y planta en un Argiudol Tipico bajo cultivo de maiz. **Revista Facultad de la Agronomia. Universidade de Bueno Aires**, v.14, n.1, p.1-8, 1993/94.
- CASSMAN, K. G.; PLANT, R. E. A model to predict crop response to applied fertilizer nutrients in heterogeneous fields. **Fertilizer Research**, v.31, p.151-163, 1992.
- CIHA, A. J. Slope position and grain yield of soft white winter wheat. **Agronomy Journal**, v.76, p.193-196, 1984.
- CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v.37, n.1, p.35-46, 1991.

- CONGALTON, R. G.; ODERWALD, R. G.; MEAD, R. A. Assessing landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.49, n.12, p.1671-1678, 1983.
- COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. 10.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1990. 264p.
- DEDECEK, R. A. Efeito das perdas e deposições de camadas de solo na produtividade de um Latossolo Vermelho-Escuro do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.11, p.323-328, 1987.
- FINKE, P. A.; GOENSE, D. Differences in barley yields as a result of soil variability. **Journal of Agricultural Science**, v.120, p.171-180, 1993.
- GÓES, L. A. C. **Estatística**, uma abordagem decisorial. São Paulo: Editora Saraiva, 1980. 428p.
- HAN, S.; HUMMEL, J. W.; GOERING, C. E.; CAHN, M. D. Cell size selection for site-specific crop management. **Transactions of the ASAE**, v.37,n.1, p.19-26, 1994.
- HANNA, A. Y.; HARLAN, P. W.; LEWIS, D. T. Soil available water as influenced by landscape position and aspect. **Agronomy Journal**, v.74, p.999-1004, 1982.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Divisão de Minas e Geologia aplicada. **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:1.000.000. São Paulo: IPT, 1981.
- JONES, T. A. Skewness and kurtosis as criteria of normality in observed frequency distributions. **Journal Sedimentary Petrology**, p.1622-1627, 1969.
- LAL, R. Soil erosion and its relation to productivity in tropical soil. In: EL-SWAIFY, S. A.; MOLDENHAUER, W. C.;

- ANDREW, L., eds. **Soil erosion and conservation**. Ankeny: Soil Conservation Society of America, 1985. p.237-247.
- LAL, R. Soil erosion problems on Alfisol in Western Nigeria. VI - effect of erosion on experimental plots. **Geoderma**, v.25, p.215-230, 1981.
- LAL, R. **Soil erosion research methods**. Ankeny: Soil Conservation Society of America, 1988. p1-6: Soil erosion by wind and water: problems and prospects.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33, p.159-174, 1977.
- LANGDALE, G. W. & SHRADER, W. D. Soil erosion effects on soil productivity of cultivated cropland. In: SCHMIDT, B. L., ed. **Determinants of soil loss tolerance**. Madison: ASA, 1982. p.95-111.
- LIBARDI, P. L.; MANFRON, P. A.; MORAES, S. O.; TUON, R. L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, n.1, p.1-12, 1996.
- MBAGWU, J. S. C. Subsoil productivity of an Ultisol in Nigeria as affected by organic wastes and inorganic amendments. **Soil Science**, v.140, p.436-441, 1985.
- MIELNICZUK, J.; SCHNEIDER, P. Aspectos sócio-econômicos do manejo de solos no Sul do Brasil. In: SIMPÓSIO DE MANEJO DO SOLO E PLANTIO DIRETO NO SUL DO BRASIL, 1º; SIMPÓSIO DE CONSERVAÇÃO DO SOLO NO PLANALTO, 2., Passo Fundo, 1984. **Anais**. Passo Fundo: PIUCS-UPF, 1984. p.3-27.
- MILLER, M. P.; SINGER, M. J.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills. **Soil Science Society of America Journal**, v.52, p.1133-1141, 1988.

- MOKMA, D. L; SIETZ, M. A. Effects of soil erosion on corn yields on Marlette soils in South-central Michigan. **Journal Soil and Water Conservation**, v.47, n.4, p.325-327, 1991.
- MONREAL, C. M.; ZENTNER, R. P.; ROBERTSON, J. A. The influence of management on soil loss and yield of wheat in Chernozemic and Luvisolic soils. **Canada Journal Soil Science**, v.75, p.567-574, 1995.
- MULLA, D. J. Mapping and managing spatial patterns in soil fertility and crop yield. In: SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **Soil specific crop management**. Madison: ASA-CSSA-SSSA, 1993. p.15-26.
- MULLA, D. J.; BHATTI, A. U.; HAMMOND, M. W.; BENSON, J. A. A comparison of winter wheat yield and quality under uniform versus spatially variable fertilizer management. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.38, p.301-311, 1992.
- MULLA, D. J.; BHATTI, A. U.; KUNKEL, R. Methods for removing spatial variability from field research trials. **Advances in Soil Science**, v.13, p.201-213, 1990.
- OLIVEIRA, J. B; ALFONSI, R. R.; PEDRO JÚNIOR, M. J. Regimes hídricos e térmicos dos solos do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 15., Campinas, 1976. **Anais**. Campinas: SBCS, 1976. p356-362.
- OLIVER, M. A. Geostatistics and its application to soil science. **Soil Use and Management**, v.3, n.1, p.8-20, 1987.
- OLMOS, I. L. J.; CAMARGO, M. N. Ocorrência de alumínio tóxico nos solos do Brasil, sua caracterização e distribuição. **Ciência e Cultura**, v.28, n.2, p.171-180, 1976.

- OLSEN, K. R.; NORTON, L. D.; LAL, R. Quantification of soil loss from eroded soil phases. **Journal of Soil Water Conservation**, v.49, n.6, p.591-596, 1994.
- OMETTO, J. C. **Registros e estimativas de parâmetros meteorológicos da Região de Piracicaba, SP**. Piracicaba: FEALQ, 1991. 76p.
- ORTIZ, M. J. Integração de sensoriamento remoto, sistema de informações geográficas e banco de dados, na identificação de culturas agrícolas de inverno. (São José dos Campos-SP). São José dos Campos, 1993. 141p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, Ministério da Ciência e Tecnologia.
- PAZ, A.; TABOADA, M. T.; GÓMEZ, M. J. Spatial variability in topsoil micronutrients contents in one-hectare cropland plot. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, v.27, n.3/4, p.479-503, 1996.
- POWER, J. F.; RIES, R. E.; SALDOVAL, F. M. Quality parameters of spring wheat and forage crops related to topsoil and subsoil thickness. **Soil Science Society of America Journal**, v.46, p.381-386, 1982.
- PREVEDELLO, B. M. S. Variabilidade espacial de parâmetros de solo e planta. (Piracicaba-SP). Piracicaba, 1987. 166p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- QUEIROZ, J. E. Parâmetros hidrodinâmicos de um solo de várzea para fins de drenagem subterrânea. (Piracicaba-SP). Piracicaba, 1996. 167p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M. E.; LOPES, E. S.; BATAGLIA, O. C. **Análise química do**

- solo para fins de fertilidade.** Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170p.
- REICHARDT, K.; VIEIRA, S. R.; LIBARDI, P. L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.10, n,1, p.1-6, 1986.
- RICTHEY, K. D.; SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E.; CORREA, O. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian Savannah Oxisol. **Agronomy Journal**, v.72, p.40-44, 1980.
- RIJSBERMAN, F. R.; WOLMAN, M. G. Effect of erosion on soil productivity: An international comparison. **Journal of Soil Water Conservation**, v.40, p.344-354, 1985.
- SALVIANO; A. A. C.; VIEIRA, S. R.; SPAROVEK, G. Dependência espacial dos teores de macronutrientes da parte aérea da crotalária juncea em área de erosão acelerada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25, Viçosa, 1995. **Resumo expandido**. Campinas: SBCS, 1995. v.4, p.1798-1799.
- SANCHEZ, P. A. **Suelos del tropico**, características y manejo. San José: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1981. 633p.
- SCOTT, H. D.; MAUROMOUSTAKOS, A.; HANDAYANI, I. P.; MILLER, D. M. Temporal variability of selected properties of loessial soil as affected by cropping. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1531-1538, 1994.
- SCHUELLER, J. K. A review and integrating analysis of spatially-variable control of crop production. **Fertilizer Research**, v.33, p.1-34, 1992.
- SESSAY, M. F.; STOCKING, M. A. Soil productivity and fertility maintenance of a degraded Oxisol in Sierra Leone. In: SUSTAINABLE LAND MANAGEMENT IN AFRICAN SEMI-

- ARID AND SUBHUMID REGIONS, DAKAR, 1995. **Proceedings**. Dakar, Senegal, 1995. p.189-201.
- SILVA, R. C.; COELHO, M. A.; MOREIRA, E. G. S.; OLIVEIRA NETO, P. R.; Efeito da erosão na produtividade de dois solos da classe Latossolo Vermelho-Amarelo. **Ciência Agrônômica**, v.16, n.1, p.55-63, 1985.
- SILVEIRA JR, P.; MACHADO, A. A.; ZONTA, E. P.; SILVA, J. B. de. **Curso de Estatística, I**. Pelotas: Editora Universitária - Universidade Federal de Pelotas. 1989. 135p.
- SOUZA, L. S. Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo. Porto Alegre, 1992, 162p. Tese (Doutorado)- Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SPAROVEK, G.; LIER, Q. J. van; ALOISI, R. R.; VIDAL-TORRADO, P. Previsão do rendimento de uma cultura em solos de Piracicaba em função da erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.17, p.465-470, 1993.
- SPAROVEK, G.; TERAMOTO, E. R.; TORETA, D. M. ; ROCHELE, T. C. P.; SHAYER, E. P. M. Erosão simulada e a produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.363-368, 1991.
- STOCKING, M. Erosion - induced loss in soil productivity. Research design. Rome: FAO, 1985. 33 p. (Consultant's Working Paper, 2)
- STOCKING, M.; PEAKE, L. Crop yields losses from the erosion of Alfisols. **Tropical Agriculture**, v.63, p.41-45, 1986.
- TABOR, J. A.; WARRICK, A. W.; PENNINGTON, D. A.; MYERS, D. E. Spatial variability of nitrate in irrigated cotton: I. Petioles. **Soil Science Society of America Journal**, v.48, p.602-607, 1984.

- TOLEDO, G. R.; OVALLE, I. I. **Estatística básica**. 2.ed. São Paulo: Atlas, 1982. 459p.
- TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; WADE, M. K.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v.38, p.45-94, 1985.
- TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; WADE, M. K.; UEHARA, G.; SUDJADI, M. Spatial variation of soil properties and rice yield on recently cleared land. **Soil Science Society of America Journal**, v.51, p.668-674, 1987.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAM. International Soil Reference and Information Centre. **GIS evaluation of GLASOD map**. Nairobi: UNIP-ISRIC, 1991.
- VAUCLIN, M.; VIEIRA, S. R.; VACHAUD, G. ; NIELSEN, D. R. The use of cokriging with limited field soil observations. **Soil Science Society of America Journal**, v.47, p.175-184 1983.
- VIDAL-TORRADO, P. Pedogênese e morfologia no Distrito de Tupi (Piracicaba-SP). Piracicaba, 1994. 212p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial. In: CURSO DE ATUALIZAÇÃO EM CONSERVAÇÃO DO SOLO, Campinas, 1995. Campinas:IAC, 1995. p.1-61.
- VIEIRA, S. R.; DE MARIA, I. C . Delineamento experimental e análise estatística na pesquisa em conservação do solo. In: REUNIÓN SOBRE METODOLOGIA PARA INVESTIGATIÓN EN MANEJO DE SUELOS, Passo Fundo, 1990. **Dialogo**. Montevideo: IICA, 1994. p.3-11. (Dialogo, 39).
- VIEIRA, S. R.; DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M. de; DECHEN, S. C. F.; LOMBARDI NETO, F. Utilização da análise de Fourier no estudo do efeito residual da adubação em uva

- na crotalária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.11, n.7, p.7-10, 1987.
- VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, v.51, n.3, p.1-75, 1983.
- VIEIRA, S. R.; LOMBARDI NETO, F.; BURROWS, I. T. Mapeamento da chuva diária máxima provável para o Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.93-98, 1991.
- VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, v.45, p.1040-1048, 1981.
- WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. **Application of soil physics**. New York, Academic Press, 1980. cap. 13, p.314-344.
- WINI, S. P.; MCGILL, W. B.; HAUGEN-KOZYRA, K. L.; ROBERTSON, J. A.; THURSTON, J. J. Improved soil quality and barley yields with fababeans, manure, forages and crop rotation on a Gray Luvisol. **Canadian Journal of Soil Science**, v.74, p.75-84, 1994.

APÊNDICES

APÊNDICE 1, Efeito pepita (C_0), $C_1 = (C - C_0)$ e alcance (a) dos modelos ajustados aos semivariogramas escalonados, fator de escalonamento (FS), número de vizinhos (NV) e variância reduzida (VR) para os atributos de plantas e de solos

Atributos	C_0	C_1	a	FS	NV	VR
Matéria seca	0,18	0,82	32	7,546	32	0,949
Altura de planta	0,15	0,85	25	0,0803	32	0,979
Espessura de solo	0,13	0,87	18	1070	32	0,913
Superficial (0-20 cm)						
Necessidade de calagem	0,42	0,52	22	1,063	32	0,924
P	0,75	0,25	12	32,02	32	1,013
MO	0,15	0,85	22	0,1018	20	0,989
pH	0,34	0,66	22	0,0512	24	0,897
K	0,77	0,23	14	0,00212		
Ca	0,30	0,70	18	0,2705	12	0,997
Mg	0,40	0,60	32	0,044	12	1,033
HA1	0,34	0,66	25	1,918	4	0,984
S	0,39	0,61	30	0,579	28	0,974
T	0,15	0,85	32	2,194	8	1,025
V	0,43	0,57	17	165,9	32	0,990
Areia*	0,43*	0,57	42	28,85	4	1,047
Silte -	0,42	0,52	33	6,7	16	1,059
Argila	0,17	0,83	40	15,86	4	1,30
Subsuperficial (20-40 cm)						
Necessidade de calagem	0,40	0,60	22	2,601	32	0,977
P	efeito	pepita	puro			
MO	0,08	0,92	20	0,1021	20	0,871
pH	0,42	0,58	18	0,1014	12	0,836
K	0,52	0,48	16	0,00641	32	0,022
Ca	0,45	0,55	16	0,5279	12	0,913
Mg	0,50	0,50	25	0,0532	20	0,989
HA1	0,36	0,64	25	4,53	4	1,021
S	0,42	0,58	18	0,8705	8	0,977
T	0,28	0,72	32	3,866	12	1,021
V	0,43	0,57	18	269	8	0,995
Areia	0,35	0,65	35	31,56	12	1,099
Silte	0,43	0,57	32	8,92	16	1,002
Argila	0,25	0,75	40	20,2	12	1,11

*Modelo Gaussiano,

APÊNDICE 2, Porcentagens de áreas por classe de atributos de planta e de solo

Atributos	Classes ¹				
	MB	B	M	R	MR
Matéria seca	12,2	33,8	20,9	15,5	17,6
Altura de planta	16,7	28,3	19,5	17,1	18,4
Espessura do solo	48,8	24,7	15,7	7,7	4,1
Superficial (0-20 cm)					
Necessidade de calagem	10,8	38,0	20,8	11,3	19,0
P	12,1	21,8	23,9	28,3	13,9
MO	19,4	23,1	19,2	18,0	20,4
pH	15,0	15,4	25,3	32,5	11,8
Ca	14,8	18,1	26,5	25,0	15,6
Mg	12,7	15,8	31,9	27,1	12,5
HAl	10,5	38,1	21,3	10,9	19,2
S	14,9	16,0	32,7	17,8	18,6
T	20,5	14,9	25,0	18,3	21,4
V	15,1	16,5	24,5	32,1	11,9
Areia	17,2	31,2	13,0	22,6	16,0
Silte	15,9	18,4	28,8	22,8	14,1
Argila	15,5	29,0	21,0	17,2	17,4
Subsuperficial (20-40 cm)					
Necessidade de calagem	12,0	34,6	21,3	14,2	17,9
MO	18,5	22,4	18,5	22,2	18,5
pH	14,7	16,2	27,4	28,9	12,8
Ca	15,5	18,7	26,1	23,3	16,4
Mg	13,4	15,9	32,6	22,6	15,4
H+Al	12,7	34,7	18,8	17,0	16,8
S	15,6	15,9	27,1	27,2	14,1
T	31,6	20,5	16,7	11,8	19,4
V	15,2	21,2	24,2	23,9	15,5
Areia	13,7	15,7	37,5	21,5	11,7
Silte	13,1	20,9	26,4	28,6	11,0
Argila	15,2	23,4	30,9	19,1	11,5

1 - MB = muito boa; B = boa; M = média; R = ruim; MR = muito ruim

APÊNDICE 3. Matrizes de erros de produção de matéria seca de crotalária (MS) com altura de planta, espessura de solo, necessidade de calagem (NC) superficial e subsuperficial e P superficial

		Altura de planta					Espessura de solo									
		B ¹		M ¹		R ¹	B		M		R					
		MB ¹	(16,7)	(28,3)	(19,5)	(17,1)	MR ¹	(18,4)	MB	(48,8)	(24,7)	(15,7)	(7,7)	MR	(4,1)	
M S	MB	(12,2)	9,2	3,0					6,4	5,4	0,3					
	B	(33,8)	7,3	20,8	5,4	0,3			21,2	8,8	3,3	0,4		0,1		
	M	(20,9)	0,2	4,4	11,1	5,0	0,3		9,8	3,8	5,1	1,6		0,7		
	R	(15,5)		0,1	3,0	8,5	3,9		6,8	2,9	2,8	1,5		1,4		
	MR	(17,6)			0,1	3,4	14,2		4,6	2,8	4,2	4,2		1,9		
		NC - superficial					NC - subsuperficial									
		B		M		R	B		M		R					
		MB	(10,8)	(38)	(20,8)	(11,3)	MR	(19)	MB	(12)	(34,6)	(21,3)	(14,2)	MR	(17,9)	
M S	MB	(12,2)	5,1	6,7	0,4				4,0	5,4	2,3	0,4		0,1		
	B	(33,8)	5,0	22,3	6,1	0,4			7,0	18,1	7,1	1,7				
	M	(20,9)	0,6	7,2	9,7	2,9	0,6		0,7	9,3	6,3	3,0		1,7		
	R	(15,5)	0,1	1,7	4,2	4,9	4,5		0,3	1,6	4,2	4,1		5,4		
	MR	(17,6)		0,1	0,6	3,1	13,8			0,3	1,5	5,0		10,7		
		P - superficial														
		B		M		R										
		MB	(12,1)	(21,8)	(23,9)	(28,3)	MR	(13,9)								
M S	MB	(12,2)	7,7	2,3	1,6	0,4	0,2									
	B	(33,8)	2,7	10,2	11,4	6,8	2,8									
	M	(20,9)	1,2	5,0	4,7	6,9	3,2									
	R	(15,5)	0,2	2,9	4,0	6,0	2,5									
	MR	(17,6)	0,4	1,4	2,2	8,3	5,3									

1 - MB = muito boa; B = boa; M = média; R = ruim; MR = muito ruim

APÊNDICE 4. Matrizes de erros de produção de matéria seca de crotalária (MS) com MO, Ca e Mg superficiais e subsuperficiais

		MO - superficial					MO - subsuperficial				
		MB ¹		B ¹		MR ¹	MB		B		MR
		(19,4)	(23,1)	(19,2)	(18)		(18,5)	(22,4)	(18,5)	(22,2)	
M S	MB	(12,2)	1,5	6,5	3,9	0,1	1,9	4,4	4,4	1,3	0,1
	R	(33,8)	8,6	11,3	5,8	0,9	8,5	12,3	4,4	2,3	6,3
	M	(20,9)	4,2	2,4	5,1	4,2	3,4	3,1	4,9	6,9	2,7
	R	(15,5)	1,9	1,2	1,6	6,4	2,1	0,8	2,6	5,6	4,4
	MR	(17,6)	3,2	1,6	2,8	6,5	2,6	1,7	2,2	6,1	5,0
		Ca - superficial					Ca - subsuperficial				
		MB		B		MR	MB		B		MR
		(14,8)	(18,1)	(26,5)	(25)		(15,5)	(18,7)	(26,1)	(23,3)	
M S	MB	(12,2)	3,1	2,9	2,6	2,1	2,1	4,2	2,4	1,7	1,7
	B	(33,8)	6,8	5,0	7,3	7,1	6,6	7,8	10,1	5,7	3,5
	M	(20,9)	3,3	4,6	4,3	5,9	5,1	4,0	5,7	3,8	2,4
	R	(15,5)	1,0	2,1	4,5	6,6	1,4	1,6	5,2	4,0	3,0
	MR	(17,6)	0,7	3,4	7,8	3,3	0,2	1,1	2,6	8,1	5,6
		Mg - superficial					Mg - subsuperficial				
		MB		B		MR	MB		B		MR
		(12,7)	(15,8)	(31,9)	(27,1)		(13,4)	(15,9)	(32,6)	(22,6)	
M S	MB	(12,2)	3,1	1,4	3,6	3,3	1,5	1,0	5,2	2,8	1,6
	B	(33,8)	3,4	4,1	9,6	10,4	5,0	3,6	8,4	10,3	6,5
	M	(20,9)	3,0	1,8	6,4	6,5	4,2	4,6	2,8	6,5	2,9
	R	(15,5)	1,9	2,2	5,0	5,1	2,3	3,5	4,6	1,5	3,6
	MR	(17,6)	1,4	6,4	7,4	1,7	0,4	3,2	11,6	1,5	0,9

1 - MB = muito boa; B = boa; M = média; R = ruim; MR = muito ruim

APÊNDICE 5. Matrizes de erros de produção de matéria seca de crotalária (MS) com H+Al, pH e S superficiais e subsuperficiais

		H+Al - superficial					H+Al - subsuperficial				
		MB ¹	B ¹	M ¹	R ¹	MR ¹	MB	B	M	R	MR
		(10,5)	(38,1)	(21,3)	(10,9)	(19,2)	(12,7)	(34,7)	(18,8)	(17)	(16,8)
M	MB	4,0	6,7	1,5			3,7	5,9	1,5	0,8	0,3
	B	5,3	20,8	6,1	1,7		7,6	17,1	6,3	2,6	0,3
	M	1,1	8,5	7,4	2,9	1,1	0,9	9,5	6,2	1,8	2,5
	R	0,2	2,0	5,2	3,5	4,6	0,5	1,7	3,8	5,0	4,4
	MR		0,1	1,1	2,9	13,4		0,5	1,0	6,7	9,4
		pH - superficial					pH - subsuperficial				
		MB	B	M	R	MR	MB	B	M	R	MR
		(15)	(15,4)	(25,3)	(32,5)	(11,8)	(14,7)	(16,2)	(27,4)	(28,9)	(12,8)
M	MB	4,3	2,7	2,3	1,6	1,2	1,7	2,9	4,3	2,7	0,5
	B	6,9	5,3	8,8	7,9	4,9	7,7	7,5	10,5	7	1,1
	M	2,8	3,2	5	7,7	2,2	3,6	3,3	5,6	6,4	2
	R	0,6	1,9	4,0	8,2	0,8	1,4	1,4	3,5	4,8	4,4
	MR	0,5	2,3	5,1	7,1	2,6	0,3	1,1	3,5	7,9	4,8
		S - superficial					S - subsuperficial				
		MB	B	M	R	MR	MB	B	M	R	MR
		(14,9)	(16)	(32,7)	(17,8)	(18,6)	(15,6)	(15,9)	(27,1)	(27,3)	(14,1)
M	MB	3,5	2,3	2,7	2,4	1,2	2,1	3,8	2,8	1,8	1,7
	B	6,1	4,3	8,5	5,1	9,7	6,6	5,3	9,9	8,2	3,8
	M	3,1	3,0	6,1	4,5	4,2	5,3	3,5	5,2	4,4	2,5
	R	1,4	1,9	6,2	4,3	1,7	1,3	2,1	5,4	3,3	3,3
	MR	0,7	4,5	9,1	1,4	1,9	0,2	1,2	3,9	9,6	2,8

1 - MB = muito boa; B = boa; M = média; R = ruim; MR = muito ruim

APÊNDICE 6. Matrizes de erros de produção de matéria seca de crotalária (MS) com CTC e V superficiais e subsuperficiais

		CTC - superficial					CTC - subsuperficial				
		MB ¹	B ¹	M ¹	R ¹	MR ¹	MB	B	M	R	MR
		(20,5)	(14,9)	(25)	(18,3)	(21,4)	(31,6)	(20,5)	(16,7)	(11,8)	(19,4)
MB	(12,2)	0,1	1,0	4,5	3,4	3,1	1,5	1,0	2,9	1,5	5,2
B	(33,8)	0,4	3,3	10,5	6,1	13,6	4,2	3,1	8,5	6,9	11,2
M	(20,9)	2,7	3,5	5,5	5,4	3,8	8,3	3,3	3,7	3,4	2,2
R	(15,5)	4,0	4,0	3,4	3,3	0,8	10,2	3,2	1,4		0,7
MR	(17,6)	13,2	3,2	1,1	0,1	0,1	7,4	9,9	0,3		
		V - superficial					V - subsuperficial				
		MB	B	M	R	MR	MB	B	M	R	MR
		(15,1)	(16,5)	(24,5)	(32,1)	(11,9)	(15,2)	(21,2)	(24,2)	(23,9)	(15,5)
MB	(12,2)	4,5	3,6	2,4	1,6	0,1	3,2	3,5	3,9	1,5	0,1
B	(33,8)	7,1	7,8	8,3	8,8	1,8	7,6	11	9,9	4,8	0,5
M	(20,9)	2,5	3,8	7,0	5,8	1,9	3,5	4,7	5,5	5,9	1,3
R	(15,5)	0,6	0,8	4,2	7,0	2,9	0,7	1,4	3,5	5,5	4,3
MR	(17,6)	0,3	0,6	2,6	9,0	5,2	0,2	0,5	1,4	6,2	9,4

1 - MB = muito boa; B = boa; M = média; R = ruim; MR = muito ruim

APÊNDICE 7. Matrizes de erros de produção de matéria seca de crotalária (MS) com as frações granulométricas superficiais e subsuperficiais

		Areia - superficial					Areia - subsuperficial				
		MB	B	M	R	MR	MB	B	M	R	MR
		(17,2)	(31,2)	(13)	(22,6)	(16)	(13,7)	(15,7)	(37,5)	(21,5)	(11,7)
M S	MB	3,7	4,7	2,2	1,5		3,5	3,1	1,5	2,6	1,5
	B	9,7	9,4	4,9	6,8	3,0	8,4	5,9	11,6	6,5	1,5
	M	2,7	8,0	2,9	3,9	3,4	1,3	3,7	9,7	4,2	2,2
	R	0,8	6,7	1,6	2,6	3,8	0,5	1,8	6,4	3,6	3,2
	MR	0,2	2,3	1,5	7,8	5,8	0,1	1,2	8,4	4,7	3,3
		Argila - superficial					Argila - subsuperficial				
		MB	B	M	R	MR	MB	B	M	R	MR
		(15,5)	(29)	(21)	(17,2)	(17,4)	(15,2)	(23,4)	(30,9)	(19,1)	(11,5)
M S	MB	4,4	6,6	1,0	0,1	0,1	5,3	6,1	0,6	0,1	0,1
	B	8,1	12,8	7,4	4,2	1,4	9,4	10,9	9,2	3,2	1,1
	M	2,5	5,8	4,7	5	2,9	0,4	5,0	9,5	3,3	2,8
	R	0,4	3,1	4,7	2,7	4,6		1,2	7,9	2,3	4,1
	MR	0,1	0,7	3,2	5,2	8,4		0,2	3,7	10,2	3,5
		Silte - superficial					Silte -subsuperficial				
		MB	B	M	R	MR	MB	B	M	R	MR
		(15,9)	(18,4)	(28,8)	(22,8)	(14,1)	(13,1)	(20,9)	(26,4)	(28,6)	(11)
M S	MB	2,6	3,4	4,0	1,5	0,6	5,6	2,7	2,9	0,6	0,4
	B	9,8	4,9	5,3	4,8	9,0	7,2	9,3	4,4	5,9	6,9
	M	2,7	4,7	3,8	7,1	2,6	0,2	5,8	6,3	6,4	2,3
	R	0,6	3,2	5,2	4,7	1,8	0,1	2,1	6,8	5,2	1,2
	MR	0,1	2,2	10,5	4,7	0,1	0,1	1,0	6,	10,3	0,2

1 - MB = muito boa; B = boa; M = média; R = ruim; MR = muito ruim