

VARIABILIDADE ESPACIAL DE PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO
EM ÁREA DE MINERAÇÃO

FRANCISCO LOTHAR PAULO LANGE JR.

ORIENTADOR: CELSO LUIZ PREVEDELLO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração "Ciência do Solo" da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.

CURITIBA
FEVEREIRO - 1993

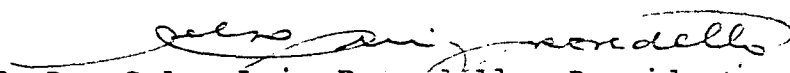


CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA-ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
"CIÊNCIA DO SOLO"


P A R E C E R

Os Membros da Comissão Examinadora, designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo", para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo candidato FRANCISCO LOTHAR PAULO LANGE JUNIOR, com o título: "VARIABILIDADE ESPACIAL DE PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO EM ÁREA DE MINERAÇÃO", para obtenção do grau de Mestre em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo" do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após haver analisado o referido trabalho e argüido o candidato, são de parecer pela APROVAÇÃO da Dissertação, com o conceito "A" completando assim, os requisitos necessários para receber o diploma de Mestre em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo".

Secretaria do Curso de Pós-Graduação em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo", em Curitiba, 26 de fevereiro de 1993.


Prof. Dr. Celso Luiz Prevedello, Presidente.


Engº Agrº Ph.D. Henrique Marinho Leite Chaves, I Examinador.


Profª Drª Beatriz Monte Serrat Prevedello, II Examinadora.


Prof. Dr. Iraci Scopel, Coordenador do Curso.



Ao meu pai, pelo seu exemplo;
à memória de minha mãe, pela
sua dedicação e amor;
ao Alexandre e Paulo Felipe,
pela paciência com o pai; e,
incondicionalmente, à *Rosane*,
pelo estímulo e compreensão,

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Terras, Cartografia e Florestas -ITCF, atual Instituto Ambiental do Paraná-IAP, e ao Governo do Estado do Paraná, pela oportunidade e apoio fornecidos, e ainda pela sensibilidade quanto à importância do desenvolvimento técnico-científico dos profissionais servidores do estado.

Ao Departamento de Solos da Universidade Federal do Paraná e seus professores e funcionários, pela acolhida e seriedade no processo de aprendizado científico.

À Petrobras-SIX (Superintendência da Industrialização do Xisto), pelo apoio financeiro e material concedido ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao CNPq pela bolsa de estudo concedida.

Ao prof. Marcos Luis de Paula Souza, pela sua amizade e apoio ao desenvolvimento dos trabalhos.

E finalmente, ao orientador, prof. Celso Luiz Prevedello, pelo exemplo de dedicação, de incansável busca do conhecimento, de humildade e de honestidade científica, cujo esforço e apoio foi condicional à conclusão deste trabalho.

"Feliz é o homem que acha sabedoria, e
o homem que adquire conhecimento
porque melhor é o lucro que ela dá
do que o da prata; e melhor a sua renda,
do que a do ouro mais fino"

PROVÉRBIOS 4, 12-13

ÍNDICE GERAL

	pag.
1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO DE LITERATURA	04
2.1 VARIABILIDADE ESPACIAL EM SOLOS	04
2.2 A GEOESTATÍSTICA	08
2.2.1 HIPÓTESES DE ESTACIONARIDADE	10
2.2.2 AUTOCORRELAÇÃO	13
2.2.3 CROSSCORRELAÇÃO	17
2.3 APLICAÇÕES DA GEOESTATÍSTICA NA CIÊNCIA DO SOLO	19
3. MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1 ÁREAS DE ESTUDO	26
3.1.1 LOCALIZAÇÃO	26
3.1.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO	26
3.2 AMOSTRAGENS	32
3.2.1 METODOLOGIA	32
3.2.2 PARÂMETROS AVALIADOS	33
3.2.2.1 DE SOLO	33
3.2.2.2 DE PLANTA	34
3.2.3 COLETAS DE CAMPO	34
3.2.3.1 DE SOLO	34
3.2.3.2 DE PLANTA	37
3.3 ANÁLISES DE LABORATÓRIO	38
3.3.1 DE SOLO	38

3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA	40
3.4.1 AUTOCORRELAÇÃO	40
3.4.2 CROSSCORRELAÇÃO	41
3.5 ERROS DE LABORATÓRIO	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1 ÁREA 3 (NÃO MINERADA)	44
4.2 ÁREA 2 (RECÉM MINERADA)	67
4.3 ÁREA 1 (MINERADA EM FASE DE REABILITAÇÃO)	95
5. CONCLUSÕES	119
6 LITERATURA CITADA	121
ANEXO 1	132
ANEXO 2	135
ANEXO 3	137
ANEXO 4	139
ANEXO 5	141

ÍNDICE DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Localização regional e local das áreas de estudo.	27
Figura 2. Ilustração esquemática da posição e orientação de cada transeção em sua respectiva área (A) e dos intervalos de amostragem para um trecho de uma das transeções (B).	35
Figura 3. Representação esquemática dos pontos de coleta de amostras de solo na transeção.	37
Figura 4. Correlograma da umidade gravimétrica (U) da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	47
Figura 5. Correlograma da massa específica do solo da camada de 0-15cm [$\rho_s(0-15)$] na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	48
Figura 6. Correlograma da massa específica do solo da camada de 15-30cm [$\rho_s(15-30)$] na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	49
Figura 7. Correlograma da massa específica das partículas da camada de 0-30cm(ρ_p) na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 20cm(1"lag"=20cm).	50
Figura 8. Correlograma da porcentagem de areia da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	51

Figura 9. Correlograma da porcentagem de silte da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	pág. 52
Figura 10. Correlograma da porcentagem de argila da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	53
Figura 11. Correlograma do armazenamento de água (A) da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	54
Figura 12. Correlograma da porosidade total (α) da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	55
Figura 13. Correlograma da umidade gravimétrica (U) da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).	56
Figura 14. Correlograma da massa específica do solo da camada de 0-15cm [$\rho_s(0-15)$] na transeção da área 3, com espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).	57
Figura 15. Correlograma da massa específica do solo da camada de 15-30cm [$\rho_s(15-30)$] na transeção da área 3, espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).	58
Figura 16. Correlograma da massa específica das partículas da camada de 0-30cm (ρ_p) na transeção da área 3, espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).	59

	pág.
Figura 17. Correlograma da porcentagem de areia da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).	60
Figura 18. Correlograma da porcentagem de silte da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).	61
Figura 19. Correlograma da porcentagem de argila da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).	62
Figura 20. Correlograma do armazenamento de água (A) da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).	63
Figura 21. Correlograma da porosidade total (α) da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).	64
Figura 22. Crosscorrelograma entre $\rho_s(15-30)$ e porcentagem de silte(A) e entre $\rho_s(15-30)$ e porcentagem de argila na (B) transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).	68
Figura 23. Crosscorrelograma entre ρ_p e a porcentagem de silte (A) e entre ρ_p e a porcentagem de argila (B) na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).	69

	pág.
Figura 24. Crosscorrelograma entre o armazenamento de água e a porcentagem de silte (A) e entre o armazenamento de água e a porcentagem de argila (B) na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).	70
Figura 25. Correlograma da umidade gravimétrica(U) da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	74
Figura 26. Correlograma da massa específica do solo da camada de 0-15cm [$\rho_s(0-15)$] na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	75
Figura 27. Correlograma da massa específica do solo da camada de 15-30cm [$\rho_s(15-30)$] na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	76
Figura 28. Correlograma da massa específica das partículas da camada de 0-30cm(ρ_p) na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	77
Figura 29. Correlograma da porcentagem de areia da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	78
Figura 30. Correlograma da porcentagem de silte da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	79

Figura 31. Correlograma da porcentagem de argila da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	pág. 80
Figura 32. Correlograma do armazenamento de água (A) da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	81
Figura 33. Correlograma da porosidade total (α) da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	82
Figura 34. Correlograma da umidade gravimétrica (U) da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).	83
Figura 35. Correlograma da massa específica do solo da camada de 0-15cm [$\rho(0-15)$] na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostras de 200cm (1"lag"=200cm).	84
Figura 36. Correlograma da massa específica do solo da camada de 15-30cm [$\rho(15-30)$] na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostras de 200cm (1"lag"=200cm).	85
Figura 37. Correlograma da massa específica das partículas da camada de 0-30cm(ρ_p) na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostras de 200cm (1"lag"=200cm).	86
Figura 38. Correlograma da porcentagem de areia da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 200cm	

	(1"lag"=200cm).	87
Figura 39.	Correlograma da porcentagem de silte da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).	88
Figura 40.	Correlograma da porcentagem de argila da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).	89
Figura 41.	Correlograma do armazenamento de água (A) da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).	90
Figura 42.	Correlograma da porosidade total (α) da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).	91
Figura 43.	Crosscorrelograma entre umidade gravimétrica e a porcentagem de areia na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).	93
Figura 44.	Crosscorrelograma entre armazenamento de água e a porcentagem de areia na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostras de 200cm (1"lag"=200cm).	94
Figura 45.	Correlograma da umidade gravimétrica (U) da camada de 0-30cm na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	98
Figura 46.	Correlograma da massa específica do solo da camada de 0-15cm [$\rho_s(0-15)$] na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens	

de 20cm (l"lag"=20cm).	99
Figura 47. Correlograma da massa específica do solo da camada de 15-30cm [$\rho_s(15-30)$] na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (l"lag"=20cm).	100
Figura 48. Correlograma da massa específica das partículas da camada de 0-30cm (ρ_p) na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (l"lag"=20cm).	101
Figura 49. Correlograma da porcentagem de areia da camada de 0-30cm na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (l"lag"=20cm).	102
Figura 50. Correlograma da porcentagem de silte da camada de 0-30cm na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (l"lag"=20cm).	103
Figura 51. Correlograma da porcentagem de argila da camada de 0-30cm na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (l"lag"=20cm).	104
Figura 52. Correlograma do armazenamento de água (A) da camada de 0-30cm na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (l"lag"=20cm).	105
Figura 53. Correlograma da porosidade total (α) da camada de 0-30cm na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (l"lag"=20cm).	106
Figura 54. Crosscorrelograma entre umidade gravimétrica (U) e a porcentagem de areia na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens	

de 20cm (1"lag"=20cm)	109
Figura 55. Crosscorrelação entre o armazenamento de água e a porcentagem de areia na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	110
Figura 56. Correlograma da altura de plantas de milho na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	111
Figura 57. Correlograma do pH da camada de 0-30cm na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	112
Figura 58. Crosscorrelograma entre a altura de plantas de milho e a umidade gravimétrica na transeção da área 1 para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	114
Figura 59. Crosscorrelograma entre a altura de plantas de milho e o armazenamento de água na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20 cm (1"lag"=20cm).	115
Figura 60. Crosscorrelograma entre a altura de plantas de milho e o pH do solo na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	116
Figura 61. Crosscorrelograma entre o pH e a porcentagem de areia na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).	117

Figura 62. Equação de regressão entre os valores de E.I. em função de V, de acordo com os critérios definidos no item 4.3.1 para o estabelecimento das zonas de influência das variáveis regionalizadas. ** significativa ao nível de 0,1%.

pág.

118

ÍNDICE DE QUADROS

	pág.
Quadro 1. Sumário da precisão das determinações em laboratório.	43
Quadro 2. Alguns resultados estatísticos de U , ρ_s , ρ_p , areia, silte, argila, A e α dos primeiros 30cm de profundidade do solo na transeção de 100m de comprimento da área 3, para os dois espaçamentos entre amostragens.	44
Quadro 3. Precisão relativa, em porcentagem, dos parâmetros ρ_p , areia, silte e argila, na transeção da área 3, para os dois espaçamentos entre amostragens.	46
Quadro 4. Comprimentos da autocorrelação de acordo com os critérios V e $E.I.$, em função dos espaçamentos de amostragens de 20 e 200cm para as propriedades físicas do solo na transeção da área 3.	66
Quadro 5. Alguns resultados estatísticos de U , ρ_s , ρ_p , areia, silte, argila, A e α dos primeiros 30cm de profundidade do solo na transeção de 100m de comprimento da área 2, para os dois espaçamentos entre amostragens.	71
Quadro 6. Precisão relativa para os parâmetros ρ_p , areia, silte e argila na transeção da área 2, para os dois espaçamentos entre amostragens. Valores em porcentagem.	72
Quadro 7. Comprimentos da autocorrelação de acordo com os critérios V e $E.I.$, em função dos espaçamentos de amostragens 20 e 200cm para as propriedades físicas do solo na transeção da área 2.	92

	pág.
Quadro 8. Alguns resultados estatísticos de U , ρ_s , ρ_p , areia, silte, argila, A e α dos primeiros 30cm de profundidade do solo na transeção de 10m de comprimento da área 1, para o espaçamento adotado.	96
Quadro 9. Precisão relativa, em porcentagem, para os parâmetros ρ_s , areia, silte argila e pH do solo na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 20cm.	97
Quadro 10. Comprimentos da autocorrelação de acordo com os critérios V e $E.I.$, para as propriedades físicas e do pH do solo na transeção da área 1. Espaçamento entre amostragens=20cm.	107
Quadro 11. Comprimentos da autocorrelação de acordo com os critérios V e $E.I.$, para pH do solo e altura de plantas de milho na transeção da área 1.	108

RESUMO

Objetivando avaliar a magnitude da variação espacial de propriedades físicas do solo em área submetida à exploração mineral do "xisto", em São Mateus do Sul (Paraná), foi empregada a Teoria das Variáveis Regionalizadas, através do uso de autocorrelogramas e de crosscorrelogramas. 2397 amostras foram coletadas ao longo de três transeções, sendo duas em áreas já submetidas a processos de mineração, recompostas através de diferentes técnicas ; e uma terceira, com as características pedológicas ainda preservadas. Intervalos de amostragem de 20 e 200cm foram adotados na coleta de amostras nas transeções. As propriedades físicas estudadas, até 30cm de profundidade, foram: umidade gravimétrica, massa específica do solo (em duas camadas), massa específica das partículas, areia, silte, argila, armazenamento de água e porosidade total. Valores de pH e de altura de plantas de milho também foram considerados numa das áreas. Os resultados mostraram que os efeitos das técnicas adotadas na recomposição dos solos foram distintos entre si, com exceção para a massa específica do solo (camada de 0-15cm) e para a porosidade total, que se mostraram sem dependência espacial. Além disso, essas técnicas promoveram alterações na estrutura espacial da areia, com conseqüentes mudanças nos comprimentos de autocorrelação da umidade gravimétrica, armazenamento e pH do solo que, na área em reabilitação, correlacionaram-se espacialmente com a altura de plantas. O tamanho de domínio que cada amostra representou na transeção foi dependente do espaçamento entre amostragens, implicando na dificuldade de se definir a técnica preferencial de recomposição do solo, e de se selecionar intervalos espaciais em futuros esquemas de amostragens nas áreas. O trabalho ainda conclui que podem ser cometidos erros apreciáveis quando se assume que o comprimento da autocorrelação é único na transeção, seja pela altas variâncias associadas aos maiores intervalos de amostragem, seja pela carência de estacionaridade do sistema. Finalmente, foi concluído que dos dois critérios adotados para se estabelecer o comprimento da autocorrelação, o visual gráfico não diferiu do conceito de escala integral em 95% dos casos.

ABSTRACT

The objective of this work was to study the magnitude of the spatial variability of physical properties of a strip-mined soil which underwent oil shale exploration, in São Mateus do Sul, State of Paraná. Regionalized Variable Theory (Geostatistics) was the method used with autocorrelation and crosscorrelation functions. 2397 samples were collected in three straight transects where two of them were submitted to different processes of soil recomposition, and a third one, with its original pedological characteristics preserved. Intervals were sampling 20 and 200 cm, and all samples were collected at 30cm depths. The physical properties studied were: soil water content, bulk density (in two layers), particles density, sand, silt, clay, soil water storage and total porosity. Data of pH and the corn plants height were also considered in one of the areas. The results indicated different effects between the techniques adopted in soil recomposition, with the exception of bulk density (0-15cm layer) and total porosity, showed no spatial dependence. Furthermore, these techniques also promoted alterations in the spatial structure of sand, with consequent alterations in the autocorrelation length of soil water content, soil water storage and soil pH. In the rehabilitation area, these properties had spatial correlation with plants height. The sample in the transection was dependent on distance between sampling, resulting in difficulties in the select spatial intervals in future plans of sampling. This study also recommends caution about overgeneralizing for results collected on one set of measured values, while assuming the range of influence is unique. One possibility may be the high variances associated with large sampling intervals or the lack of stationarity of the two of adopted criteria to make the range of influence, the visual graphic (V) did'nt defer with the integral scale concept (E.I.) in 95% of the cases.

1. INTRODUÇÃO

No estudo da Ciência do Solo, os processos de formação dos solos e as conseqüências das contínuas mobilizações observadas na superfície da terra determinam uma variabilidade em suas propriedades. Muitos pesquisadores têm reconhecido estas variações em termos espaciais, já há muito tempo (Montgomery, 1913; Smith, 1910; Waynick, 1918). Todavia, a utilização de amostras consideradas homogêneas em laboratório e a grande maioria dos modelos, teorias e recomendações ainda empregados, presumem o solo como homogêneo. Para experimentos de campo, a recomendação tem sido a escolha de áreas homogêneas, que minimizem os efeitos provocados pela variabilidade natural. No entanto, para a solução desses problemas de variabilidade pela estatística clássica, existem algumas exigências que nem sempre são satisfeitas, induzindo a sérios comprometimentos de avaliação.

A partir do início da década de 1970, surgiu grande interesse da comunidade científica internacional da Ciência do Solo em desenvolver ferramentas que permitissem levar em consideração a variabilidade espacial dos solos. Assim, a princípio aplicada para atender problemas de avaliação e controle de qualidade em áreas mineradas, foi desenvolvida a Teoria das Variáveis Regionalizadas (Geoestatística), permitindo a interpretação dos resultados com base na estrutura espacial de sua variabilidade. Muito embora a maior parte das aplicações envolvendo a Geoestatística à Ciência do Solo considere a variabilidade natural dos solos, a crescente proliferação de áreas

alteradas por atividades de mineração vem determinar a necessidade de se conhecer o comportamento espacial de suas propriedades, considerando os processos empregados na recomposição antropomórfica desses solos.

A importância dessas informações são revestidas de caráter prático e de uso imediato, pois muitas das áreas exploradas pela mineração vêm sendo objeto de amostragens quanto ao estabelecimento de técnicas de manejo de uso e de reabilitação à atividade produtiva.

Em São Mateus do Sul, Estado do Paraná, diferentes processos de reabilitação de áreas degradadas pela mineração do xisto vêm sendo empregadas (Zamberlan e Viana, 1988). Neste trabalho, realizado na Petrobras- SIX (Superintendência de Industrialização do Xisto), em São Mateus do Sul, foram consideradas duas áreas submetidas a diferentes práticas mecânicas de recomposição dos solos (uma delas em processo de reabilitação) e, ainda, uma terceira, com suas características naturais preservadas.

A partir da utilização de funções Geoestatísticas aplicadas em diferentes transeções e intervalos de amostragens, este trabalho teve por objetivo avaliar:

(i) os efeitos que as técnicas adotadas na recomposição dos solos promoveram na estrutura espacial de alguns parâmetros físicos do solo, de pH do solo e de altura de plantas; e

(ii) a magnitude da variação espacial desses parâmetros, visando selecionar intervalos espaciais em futuros

esquemas de amostragens nas áreas.

Embora sejam reconhecidas grandes alterações nas propriedades físicas nessas áreas mineradas, promovidas pela remoção, transporte e redistribuição dos solos (Zamberlan e Viana, 1988; Lucchesi, 1988; e Souza et al. 1989), nenhum estudo foi conduzido no sentido de avaliar seus efeitos na estrutura espacial de suas propriedades.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A preocupação com a variabilidade espacial de solos não é assunto novo, mas o desenvolvimento da Teoria das Variáveis Regionalizadas (ou Geoestatística), como instrumento complementar à Estatística Clássica, veio dar nova ênfase aos estudos sobre a variabilidade espacial em diversos ramos da ciência, notadamente na Ciência do Solo.

Neste capítulo são abordados alguns trabalhos que marcaram o desenvolvimento e aplicações dessa alternativa estatística no campo da Ciência do Solo.

2.1 VARIABILIDADE ESPACIAL EM SOLOS

A formação do solo é resultante de uma série de fatores e o produto final é bastante heterogêneo em relação às suas propriedades e características (Warrick & Nielsen, 1980; Silva et al. 1989). A heterogeneidade de suas propriedades físicas e químicas também são reconhecidas por Russo & Bresler (1981), que garantem que ela ocorre tanto em superfície como em profundidade. Cassel e Nelson (1985), da mesma forma, definem a variabilidade espacial de um solo como sua variação nas direções vertical e horizontal. Moura et al. (1992), além disso, afirmam que as propriedades do solo são variáveis contínuas, das quais se espera que variem de acordo com a direção e distância de separação, podendo existir dependência espacial entre elas. Por outro lado, segundo Trangmar et al. (1985), os pesquisadores da Ciência do

Solo, muitas vezes limitados pelo número de observações, necessitam extrapolar propriedades de solos de locais conhecidos para outros desconhecidos, sem considerar a heterogeneidade. Essas extrapolações, evidentemente, não ficam isentas de discussão. Reichardt et al. (1986), por exemplo, concorda que, com frequência, a única heterogeneidade considerada é no sentido da profundidade (z) dos solos, reconhecendo-se horizontes ou camadas de propriedades distintas e que, para a instalação de experimentos, é comum procurar áreas "homogêneas", segundo um plano horizontal x,y. Nesse aspecto, Ball & Willians (1968), em estudo sobre a variabilidade de propriedades químicas em solos não cultivados, concluíram que era indispensável considerar quantitativamente a variabilidade espacial em qualquer estudo sobre solo. Esta conclusão também foi reforçada por Gurovich (1982) para propriedades hidráulicas do solo.

A Ciência do Solo iniciou-se utilizando amostras homogêneas em laboratório, explicam Reichardt et al. (1986), e para experimentos de campo, a utilização de modelos aplicados para solos homogêneos nas três direções (x,y,z) eram preferidos por serem muito mais simples do que aqueles que consideravam a variabilidade para uma ou mais direções. Desse modo, a análise de dados obtidos em condições de campo sempre representou uma dificuldade para as diversas áreas da Ciência da Terra (Silva et al. 1989), seja pelas variações naturais ocorrentes espacial ou temporalmente em suas propriedades, seja pelos erros laboratoriais, como questionam Cameron et al (1971). Contudo, ao que parece, as variações de laboratório são muito pequenas

quando comparados com as variações de campo (Hammond, 1958; Gajem et al. 1981).

Desde o início do século, pesquisadores como Montgomery (1913), Robinson & Lloyd (1915) e Pendleton (1919), vinham trabalhando com problemas de variabilidade de solos em campo e, Montgomery (1913) e Waynick (1918) já realizavam experimentos onde os pontos de observação eram previamente conhecidos. Mas, provavelmente, foi Harris (1920) o primeiro a se preocupar com uma análise mais adequada na interpretação da variabilidade espacial. Foi também na década de 1920 que Fisher desenvolveu experimentos de campo objetivando descobrir uma solução tecnológica para os problemas das variações encontradas em solo, através da casualização e formação de blocos (Mc Bratney, 1984). Fisher, em 1956, também propôs uma teoria de análise estatística segundo a qual o problema da variação poderia ser resolvido através da casualização e da repetição, reconhecida como Estatística Clássica (Nielsen et al. 1983). A análise de dados através dos métodos estatísticos clássicos, como a análise da variância, segundo Becket & Webster (1971) e Hamlet et al.(1986), assumem independência espacial entre as amostras. Gurovich & Stern (1983) também comentam que o enfoque estatístico clássico descreve a variabilidade dos parâmetros através de observações estatisticamente independentes, mas que, sem dúvida, as propriedades do solo não são completamente desordenadas no espaço. Por isso, a estatística clássica, por considerar o campo em termos de um conjunto de observações reduzidas a uma média e medidas de sua divergência, sem considerar sua distribuição espacial, é

limitada como instrumento capaz de avaliar a variabilidade espacial (Silva et al. 1989).

Érrico (1984) observa que a estatística clássica baseia-se em dois princípios: (i) independência entre amostras; e (ii) os eventos podem ser repetidos indefinidamente. Prevedello (1986), por outro lado, adiciona: (iii) os erros de observação têm média igual a zero; e os erros são independentes uns dos outros. No caso das Ciências da Terra, esses princípios (ou exigências) nem sempre são satisfeitos ou testados (Prevedello, 1986; Silva et al. 1989). Frente a isso, Nielsen et al. (1983) enumeraram algumas questões que deveriam ser respondidas pelas novas técnicas estatísticas a serem aplicadas no estudo da variabilidade espacial: (i) qual o domínio que cada amostra representa?; (ii) qual a distância entre amostras?; (iii) onde localizar as amostragens?; e (iv) qual o número adequado de amostras? A estatística clássica não atende a todas essas questões.

Segundo Gurovich (1983), já a partir dos anos 70 surgiu grande interesse da comunidade científica internacional da Ciência do Solo em desenvolver novas ferramentas que permitissem considerar a variabilidade espacial e quantificar a sua estrutura. Uma solução para esse problema já havia sido conhecida, nos anos 60, com o desenvolvimento da Teoria das Variáveis Regionalizadas (ou Geoestatística), que objetivava, inicialmente, atender problemas na área da Geologia e Mineração e que, mais recentemente, vem sendo amplamente difundida e aplicada em diversos ramos da ciência. Textos básicos sobre essa teoria são

apresentados por David (1977), Journell & Huijbregts (1978), Clark (1979) e, em versão mais avançada, por Kim (1988).

2.2 A GEOESTATÍSTICA

O primeiro progresso significativo na caracterização da variabilidade espacial surgiu nas minas de ouro da África do Sul, quando D. G. Krieger^{*}, em 1951, demonstrou como a variância de um parâmetro medido foi frequentemente dependente da distância entre amostragens (Vieira et al. 1988). Porém, o maior avanço foi alcançado por G. Matheron e sua equipe do Centro de Morfologia Matemática, em Fontainebleau (FR), em 1963, com a publicação do tratado "Teoria das Variáveis Regionalizadas". A aplicação dessa teoria em problemas de Geologia e Mineração tornou-se conhecida popularmente como Geoestatística (Clark, 1979). Etimologicamente, o termo Geoestatística designa o estudo estatístico de um fenômeno natural, enquanto que Matheron o define como "aplicação do formalismo de funções causais no reconhecimento e estimativa de um fenômeno natural" (Journell & Huijbregts, 1978).

Conceitualmente, a geoestatística permite uma alternativa aproximada onde as correlações espaciais são quantificadas (Warrick et al. 1986). Nessa teoria, de acordo com Vieira et al. (1983), uma variável regionalizada é uma função

* O processo de interpolação na geoestatística, conhecido como "Kriging" (ou Krigagem), é um reconhecimento ao trabalho pioneiro de D. G. Krieger.

espacial numérica, que varia de um local ao próximo de aparente continuidade. A idéia de "regionalização" é de uso corrente na Geologia, pois o próprio conceito de "zona de influência" reflete a relação dos valores obtidos num determinado ponto com a sua posição espacial (Érrico, 1984). Portanto, segundo o mesmo autor, numa determinada distribuição espacial, as amostras estão relacionadas entre si, e não é possível repetirem-se os eventos. Este fato, limitante na aplicação da estatística clássica, pode ser resolvido através da introdução do conceito das variáveis regionalizadas, por permitir a obtenção da estrutura da variância.

Enquanto que na estatística clássica se utiliza de amostras de campo coletadas de forma inteiramente casualizada, não levando em conta a posição geográfica de cada amostragem, na geoestatística se procede segundo um plano espacial determinado, sendo a amostragem regionalizada (Reichardt et al. 1986; Prevedello 1986; entre outros). Essa amostragem pode ser em uma transeção em dada direção x , com intervalos de amostragens eqüidistantes entre si por uma distância (l), denominada "lag", ou segundo um "grid" (malha), nas direções x, y , também eqüidistantes. Assim, sendo $Z(x)$ o valor de uma variável no ponto (x), o problema é representar a variabilidade da função $Z(x)$ quando x varia. A solução dada pela Geoestatística, segundo Journell & Huijbregts (1978), consiste em interpretar cada valor $z(x_i)$ como uma realização particular de uma função aleatória $Z(x)$ no ponto x_i . O conjunto dessas variáveis aleatórias auto-correlacionadas $Z(x)$, quando x varia dentro do domínio D ,

constitui uma "Função Aleatória". O problema de caracterizar a variabilidade da distribuição espacial $Z(x)$ reduz-se na caracterização das correlações de várias variáveis aleatórias $Z(x_i)$, $Z(x_j)$, que constituem a função aleatória $Z(x)$.

Journell & Huijbregts (1978) concluem que esta interpretação fundamental é justificada posteriormente, se resultarem em soluções coerentes e aceitáveis para os vários problemas encontrados na prática.

A variabilidade espacial com dependência, segundo Warrick et al. (1986), é comumente descrita através de correlogramas ou variogramas, que definem o grau de dependência e o alcance ou domínio de cada amostragem ou medida (Reichardt et al. 1986).

2.2.1 HIPÓTESES DE ESTACIONARIDADE

A estacionaridade surgiu da definição de que as funções covariância e variograma dependiam simultaneamente de dois pontos de apoio x_1 e x_2 (Journell & Huijbregts, 1978). Dessa forma, os vários aspectos do par de variáveis regionalizadas [$Z(x_1)$ e $Z(x_2)$] deveriam ser avaliados por inferências estatísticas, possíveis se essas funções dependerem somente da distância entre os dois pontos de apoio.

Com uma única amostra, tudo que se pode conhecer sobre a função aleatória da variável regionalizada $Z(x_i)$ é um evento. Se se deseja estimar valores para locais não conhecidos, deve-se introduzir a restrição de que a variável regionalizada deve ser estatisticamente homogênea e isotrópica (Olea, 1975). Marechal

(1975) concorda que estacionaridade da função aleatória exige que o fenômeno observado seja homogêneo ao longo do espaço, e Landim (1985) complementa que esta continuidade da função está ligada à suposição de que os valores de um parâmetro do solo, para localizações vizinhas, sejam aproximadamente os mesmos. Formalmente, segundo Olea (1975), a variável regionalizada será estacionária quando as estatísticas das variáveis aleatórias $Z(x_i+h)$ forem as mesmas para todo o vetor h e, de acordo com o número k dos momentos estatísticos, a variável é chamada estacionária de ordem k . A estacionaridade de segunda ordem é usualmente utilizada em Geoestatística.

Três possíveis suposições ou hipóteses com relação ao tipo de estacionaridade da função aleatória $Z(x_i)$ podem ser feitas, segundo Journell & Huijbregts (1978), Warrick et al. (1986), Kim (1988), que devem obedecer as seguintes condições:

1) Hipótese de estacionaridade de ordem 2 ou forte estacionaridade:

(i) o valor esperado $E[Z(x_i)]$ existe e não depende da posição x ;

(ii) para cada par de variáveis aleatórias $[Z(x_i), Z(x_i+h)]$, a função covariância $C(h)$ existe e depende de h .

A hipótese de estacionaridade ordem 2 implica na existência de uma finita variância dos valores medidos e não deve ser satisfeita em muitos fenômenos físicos que possuem uma infinita capacidade de dispersão como, por exemplo, os valores de teores de ouro em minas. Se a hipótese de estacionaridade de ordem 2 é atendida, a covariância $C(h)$ e o variograma $2\gamma(h)$ são duas

ferramentas equivalentes para a caracterização da autocorrelação entre duas variáveis $Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$ separadas pela distância h .

2) Hipótese Intrínseca, ou de fraca estacionaridade, ou de ordem zero:

(i) o valor esperado $E\{Z(x_i)\}$ existe como acima, não dependendo da posição de x ;

(ii) o par das variáveis aleatórias $\{Z(x_i), Z(x_i+h)\}$ possui uma variância finita e não depende do ponto x_i para todos os vetores h .

Para evitar restrições no caso de variância finita, necessária para hipótese de estacionaridade de ordem 2, foi definida a hipótese intrínseca, que exige a existência e estacionaridade apenas do variograma. Sua expressão matemática é:

$$2\gamma(h) = E\{[Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2\} \quad (1)$$

onde a função $\gamma(h)$ é o semivariograma. O prefixo semi diferencia a outra expressão (1) da equação:

$$\gamma(h) = 1/2 E\{[Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2\} \quad (2)$$

O sistema que satisfaz a estacionaridade de ordem 2 também satisfaz a hipótese intrínseca, mas o oposto não é verdadeiro.

3) Hipótese da Krigagem Universal ou, segundo Kim (1988), de primeira ordem:

Nessa hipótese, a função aleatória $Z(x_i)$ considera dois

componentes, para qualquer localização:

$$Z(x_i) = m(x_i) + \varepsilon(x_i) \quad (3)$$

onde $m(x_i)$ é a "deriva" e $\varepsilon(x_i)$ o erro residual. Segundo Vieira (1983), se a função aleatória é estacionária na ordem $k(k>0)$, é também estacionária para todas as ordens menores que k . Conseqüentemente, se função aleatória $Z(x_i)$ é estacionária na ordem 2, então é também intrínseca. Todavia, o inverso não é necessariamente verdadeiro.

Enfim, de acordo com Gajem et al. (1981), a estacionaridade é uma questão de escala, tanto da região como do intervalo entre amostragens.

2.2.2 AUTOCORRELAÇÃO

A análise de autocorrelação é um método alternativo de examinar a relação espacial entre observações de uma determinada propriedade, obtida normalmente ao longo de uma transeção e com intervalos regulares entre amostras (Gurovich & Stern, 1983; Silva et al. 1989). A medida da força da associação linear entre os pares de observações é empregado, segundo Nielsen et al. (1983), para definir a distância de separação entre observações acima das quais não há correlação de pares de valores. De acordo com Gajem et al. (1981), a função autocorrelação da variável aleatória representa a quantificação das alterações de uma forte correlação de dependência para uma independência dos valores de

determinado parâmetro.

O uso da função autocorrelação implica no atendimento de certas hipóteses matemáticas, em particular, formas de estacionaridade. A hipótese de estacionaridade forte ou de ordem 2 é exigida para a caracterização da autocorrelação (Gajem et al. 1981).

Desde que a estacionaridade da covariância implica na estacionaridade da variância, a função autocorrelação e a função semivariograma são duas ferramentas equivalentes para a caracterização da autocorrelação entre observações separados por uma distância h (Journel & Huijbregts, 1978; Vauclin et al. 1982). Já Gurovich & Stern (1983), classificam a autocorrelação como uma função mais sensível que o método do semivariograma para detectar diferenças entre pontos e concluem que se constitui numa excelente ferramenta para analisar dados no campo.

A função autocorrelação tem, de acordo com Gajem et al. (1981), certas vantagens, mesmo embora necessite de uma forma de estacionaridade relativamente forte. Os valores da função autocorrelação são normalizados para o intervalo $-1, 1$, o que facilita a interpretação dos valores.

Assumindo que a função aleatória $Z(x)$, representando o valor de um parâmetro z numa dada localização x , é estacionária (suas propriedades estatísticas são independentes da posição), a covariância entre as observações é somente função da distância h entre os pares de observações. Além disso, se $Z(x)$ também apresenta uma finita média e variância, então a função autocorrelação é definida por (Vauclin et al. 1982):

$$\rho(h) = \text{COV}[Z(x), Z(x+h)]/\sigma^2 \quad (4)$$

Geralmente, a distribuição conjunta de $Z(x)$ e $Z(x+h)$ não é conhecida e $\rho(h)$ deverá ser estimada por um conjunto de dados. No caso, as equações utilizadas para estimar a função autocorrelação desse conjunto de dados $r(h)$, são apresentadas no ítem 3.4.1.

O autocorrelograma é um dos instrumentos utilizados na avaliação do grau de dependência dos valores medidos, sendo definido como a expressão gráfica da correlação linear entre uma série espacial (ou temporal) e a mesma série, em intervalos subseqüentes de espaço (ou tempo), desde que esta série tenha sido obtida ao longo de uma transeção (ou "grid") com intervalos regulares entre amostras (Silva et al. 1989). Trata-se, portanto, de um gráfico de r em função do "lag" h . O valor máximo é 1 para $h=0$ e tende a decrescer com o aumento do "lag" h . Quando $h=1$ e os pontos 1,2, ...,n são igualmente espaçados, a correlação é feita de x_1 com x_2 , x_2 com x_3 , ... $x_{(n-1)}$ com x_n . Para $h=2$, a correlação é feita de x_1 com x_3 , x_2 com x_4 , ..., $x_{(n-2)}$ com x_n , e assim sucessivamente (Gajem et al. 1981; Prevedello, 1987). Assim, torna-se possível determinar os espaçamentos entre os pontos de amostragem para os quais as medidas de uma propriedade do solo em estudo realmente são dependentes entre si.

Segundo Gajem et al. (1981), Prevedello (1987), entre outros, existem três tipos básicos de autocorrelogramas: Num deles os coeficientes r_h decrescem gradualmente; no outro os

valores de r_h declinam rapidamente dentro dos primeiros "lags", apresentando independência entre amostras; e no terceiro tipo os coeficientes decrescem mais lentamente, indicando dependência de longo alcance.

Para autocorrelogramas onde os valores decrescem para zero com o aumento da distância, com valores negativos significativamente diferentes de zero, a série de dados não poderá ser caracterizada pela função autocorrelação, apresentando um "drift" (Vauclin et al. 1982), problema que poderá ser resolvido através do autocorrelograma residual dos valores médios. Outros autores, entretanto, como Gajem et al. (1981), Russo & Bresler (1981) e Gurovich & Stern (1983), obtiveram autocorrelogramas com valores negativos, mas interpretaram que os valores pequenos da propriedade estavam associados com valores grandes no centro do campo.

Para a determinação do alcance (ou zona de influência ou comprimento da autocorrelação), que é o intervalo dentro do qual as amostras espaciais mantêm relação de dependência ou, o intervalo de amostragem que poderá ser representado por uma única amostra, alguns métodos são apresentados por Davis (1973); Webster e Cuanalo (1975); Haan (1977); Gajem et al. (1981); Vauclin et al. (1982); Libardi et al. (1986); entre outros. Alguns autores consideram que a dependência entre os valores termina na distância correspondente ao ponto onde a curva do autocorrelograma intercepta o eixo das abcissas. Já Nielsen & Cassel (1984), por exemplo, definem o comprimento da autocorrelação como a distância entre observações (λ), além da qual os valores de r_h são

menores ou igual ao inverso da base do logaritmo neperiano (e), equivalente a 0,37, conforme a equação:

$$r_h = \exp(-h/\lambda) \quad (5)$$

Um outro critério para se estimar o alcance é através do conceito de escala integral (E.I.), definido segundo Gurovich e Stern (1983) como a área do autocorrelograma, abaixo da curva de autocorrelação. Segundo esses autores, o valor de E.I. corresponde ao tamanho de uma sub-unidade dentro do campo que pode ser considerada homogênea com respeito ao parâmetro em estudo.

Warrick et al. (1986); Gajem et al. (1981); Campbell (1978); Yost et al. (1982); Russo & Bresler (1981); Vieira (1980); Vauclin et al. (1982); Libardi et al. (1986); entre outros, apresentam valores de alcances para diversos parâmetros e critérios. Os valores variam em detalhes, mas o importante, segundo observam Warrick et al. (1986), é que eles podem se mostrar dependentes dos intervalos entre amostragens, com uma tendência para amostragens de grandes intervalos resultar em alcances maiores. Esses autores ainda enfatizam que o comprimento da autocorrelação é um problema complexo, envolvendo variações entre amostras, intervalo entre amostragens e estacionaridade.

2.2.3 CROSSCORRELAÇÃO

Se mais de uma propriedade do solo for medida de forma

regionalizada, pode-se, também, calcular os coeficientes de crosscorrelação e construir o correspondente crosscorrelograma. Os coeficientes de crosscorrelação são calculados essencialmente do mesmo modo que aqueles da autocorrelação fazendo, porém, correlações entre duas variáveis distintas (Reichardt et al. 1986). Portanto, é uma característica da crosscorrelação não acontecer com variáveis únicas, sendo necessária uma simetria de relações (Webster, 1985).

Nielsen et al. (1983) apresentam, para o cálculo do coeficiente de crosscorrelação espacial (r_c), a seguinte equação:

$$r_c(h) = \frac{\text{covar}[F(x), G(x+h)]}{\text{var}[F(x)] \cdot \text{var}[G(x+h)]} \quad (6)$$

onde F e G são duas séries de variáveis distintas; covar é a covariância; var é a variância; e h é o "lag".

Nielsen et al. (1983), estudando a variabilidade espacial e temporal da temperatura da cobertura e umidade do solo, utilizando-se da crosscorrelação, concluíram significativa correlação entre os dois parâmetros.

Mc Bratney e Webster (1983) examinaram a crosscorrelação entre as frações granulométricas a partir de amostras de superfície e de profundidade em 10,6ha de solos da Estação Experimental de Woburn, Inglaterra.

Reichardt et al. (1984), do mesmo modo, avaliaram a influência da umidade do solo sobre a absorção de nutrientes,

produtividade e fixação biológica do nitrogênio de uma cultura agrícola. Este trabalho está entre os primeiros que mostram a variabilidade espacial de parâmetros de planta como consequência da variabilidade do solo.

2.3 APLICAÇÕES DA GEOESTATÍSTICA NA CIÊNCIA DO SOLO

Segundo Reichardt (1986), a introdução de métodos de análises baseadas na teoria das variáveis regionalizadas na Ciência do Solo, parece ser devida principalmente a D. R. Nielsen, da Universidade da Califórnia, quando, da aplicação de resultados obtidos em laboratório para condições de campo, Nielsen et al. (1973) verificaram diferentes distribuições da variabilidade em solos.

Cassel & Baver (1975) estudaram a variabilidade espacial da densidade do solo e retenção de água, chegando a indicar o número de amostras necessárias para uma avaliação correta desses parâmetros dentro de limites de confiança estabelecidos.

Cameron (1978) publicou um estudo completo sobre a variabilidade das curvas de retenção de água no solo e da condutividade hidráulica, obtendo coeficientes de variação de 13% entre as curvas e diferenças de até 100 vezes para os valores de condutividade hidráulica. Campbell (1978), similarmente, estudou a variabilidade espacial dos teores de areia e pH em duas unidades de solo que habitualmente são mapeadas em conjunto, concluindo que as unidades de solo podiam ser claramente separadas através da análise geoestatística. A

influência da distribuição espacial dos teores de areia sobre os esquemas de amostragens, utilizando-se de autocorrelogramas e crosscorrelogramas, também foi estudada por O'Halloran et al. (1986), que indicaram significativo padrão cíclico dos valores de areia para distâncias de 56 a 65m. Apesar da importância e do reconhecimento das necessidades de separação entre as unidades de solos, Webster & Cuanalo (1975), bem como Nwardialo & Hole (1980), concluíram que a análise geoestatística se constitui no melhor método para esse propósito.

Um texto básico para a compreensão das aplicações das técnicas geoestatísticas na classificação de solos e separação de suas unidades, foi escrita por Webster (1977). O autor utilizou-se da análise espectral da função autocorrelação para descrever variações do solo ao longo de uma transeção. Campbell (1978), Haurasulina et al. (1980), Yost et al. (1982) e Xu & Webster (1984) também pesquisaram aspectos concernentes à variabilidade espacial da salinidade e propriedades químicas com objetivos de classificação e levantamento de solos. No Brasil, Van der Berg (1985) estudou a variabilidade pedológica e geomorfológica dos solos de várzeas do Vale da Ribeira, utilizando-se de transeções com espaçamentos de 20 a 40m, determinando a granulometria e várias propriedades químicas.

Investigando, em transeções, a variabilidade espacial de características de perfis de solo Solonetz, Carter & Pearen (1985) observaram a ocorrência de periodicidade para pH e condutividade elétrica para distâncias maiores de 20-25cm.

Warrick e Nielsen (1980) discutem, de forma clara, sobre a variabilidade geral dos solos, as diferentes formas

de expressá-la, a problemática do número de amostragens necessárias, a autocorrelação e a análise espacial. Nielsen et al. (1983) e Vieira (1983) complementaram o trabalho anterior e se estenderam a processos geoestatísticos de interpolação ponderada como o "Kriging" e o "cokriging", anteriormente abordados por Delfiner & Delhome (1975), Delhome (1978), Volpi & Gambolati (1978); Burgess & Webster (1980) e Webster e Burgess (1980).

Reichardt et al. (1986) comenta que as maiores contribuições em estudos de variabilidade espacial na área agronômica, são relativos à Física do Solo. São exemplos: Russo & Bressler (1981), Vieira et al. (1981), Gajem et al. (1981), Gurovich & Stern (1983a) (1983b), Nielsen et al. (1983), Nielsen & Cassel (1984), Duffy (1985), Wierenga (1984), e Wagenet (1984), entre outros. No Brasil, provavelmente, o primeiro trabalho de aplicação da Geoestatística na Ciência do Solo foi de Libardi et al. (1986).

Vieira et al. (1981), aplicando a técnica da Krigagem a partir de 1280 determinações da taxa de infiltração da água no solo, concluíram que seriam necessárias 128 determinações para representar uma área de 8000m^2 . Sisson & Wierenga (1981), com o objetivo de conhecerem as dimensões das sub-áreas homogêneas quanto ao processo de infiltração da água no solo, chegaram a um valor de 20m para E.I. Semelhantemente, Gurovich & Stern (1983a), concluíram que o emprego das técnicas geoestísticas permitem separar mais racionalmente as unidades de manejo agronômico no campo.

Libardi et al. (1986), a partir de amostras

regularmente espaçadas numa transeção de 150m de comprimento, concluíram que tanto a função autocorrelação como a semivariância promoveram informações sobre as distâncias de separação entre as quais as amostras revelaram dependência espacial.

Integrando as variabilidades espacial e temporal, Vachaud et al. (1985) pesquisaram a estabilidade temporal da variabilidade espacial dos parâmetros de umidade do solo.

Vieira et al. (1988) analisaram um solo de textura argilosa fortemente estruturado, concluindo que a extremamente grande variabilidade espacial do local sugeria que os movimentos de água e soluto no solo eram muito complexos, e que o sucesso da interpretação e previsão de seu movimento requeria uma extensa e complexa malha para o monitoramento.

A variabilidade espacial da resistência à penetração num Latossolo Vermelho escuro, ao longo de uma transeção de 40m, com amostragens espaçadas de 10cm, foi avaliada por Silva et al. (1989), que observaram grande variabilidade da área quanto ao parâmetro estudado, assim como a ocorrência de variações cíclicas ao longo da transeção devido ao intenso tráfego de máquinas e implementos agrícolas.

Folorunzo (1983), estudou a variabilidade temporal e espacial da desnitrificação em solos da Califórnia, concluindo a importância dessa variabilidade sobre a dinâmica do N_2 .

A variabilidade espacial do fósforo foi estudada por O'Halloran et al. (1985), numa área de 10,5x40m, através de 132 amostras regularmente espaçadas. Eles concluíram que mais de 90% da variação do teor de fósforo do solo foi devida às mudanças

texturais.

Em termos biológicos, Wollum & Cassel (1984) estudaram a variabilidade espacial da população de Rhizobium japonicum em dois tipos de solo da Carolina do Norte, demonstrando haver grandes variações da população em pequenas distâncias.

Vauclin et al. (1982), a partir de duas transeções e por meio das funções autocorrelação e semivariograma, estudaram a variabilidade da temperatura superficial do solo após o processo da irrigação. Eles concluíram que a estrutura espacial da temperatura se correlacionou bem com a estrutura da umidade gravimétrica a 5cm de profundidade. Morkoc et al. (1985b), também trabalhando com temperatura e umidade do solo, desenvolveram uma metodologia para estimativa de uma em função da outra. Hatfield et al. (1982) e Vieira et al. (1983), trabalharam com a variabilidade temporal da temperatura superficial de solos, a partir de dados obtidos por Sensoriamento Remoto. Hatfield et al. (1982) concluíram que a variabilidade do dia-a-dia era muito alta e que parte dela era explicada pelas condições meteorológicas.

Na área agronômica, a maioria dos trabalhos envolvendo o uso da Geoestatística está ligada a aspectos da variabilidade do solo e poucos para parâmetros de plantas. Um dos primeiros trabalhos associando a variabilidade de parâmetros de produção de plantas foi apresentado por Stern (1981) e Bresler et al. (1982). Mc Bratney & Webster (1981) também apresentaram um estudo considerando a variabilidade espacial da produção de trigo. Vieira et al. (1983), para a mesma cultura, quantificaram a variabilidade espacial da quantidade de nitrogênio nos grãos. Analisando dados

de plantas de arroz e de laranja, Mc Bratney (1984) confrontou-se com resultados de autocorrelogramas, ambos bidimensionais, sendo observada uma maior anisotropia para a distribuição espacial na produção de arroz.

Reichardt et al. (1984) discutem como a variabilidade espacial da umidade do solo pode ser utilizada com vantagens para se conhecer a influência sobre os parâmetros de uma cultura. Eles utilizaram a crosscorrelação para mostrar que a variabilidade dos parâmetros de planta foi consequência da variabilidade do solo. Morkoc et al. (1985) simularam uma variabilidade de umidade do solo e da salinidade da água e correlacionaram espacialmente com a produtividade do sorgo. Uehara et al. (1985) analisaram os dados de comportamento do solo e da cultura do arroz, concluindo que o alcance da dependência espacial para os componentes da produção foi maior que para as propriedades do solo.

No Brasil, um dos trabalhos pioneiros no estudo da variabilidade espacial de parâmetros de solo e de planta, foi desenvolvido por Prevedello (1987), em área considerada "homogênea" para propósitos agrícolas. Através de autocorrelogramas e semivariogramas, concluiu que as dependências espaciais mostraram-se de longo alcance, no sentido do comprimento da área, que foi de 4810m^2 . O trabalho ainda conclui que a área de estudo não se mostrou homogênea para nenhum dos 47 parâmetros considerados. Diante disso e através do conceito de escala integral, o autor estabeleceu critérios para futuras sub-unidades de amostragens e sub-parcelas consideradas independentes.

Reichardt et al. (1986) enfatizam que a tendência atual é desenvolver experimentos em grandes áreas, sem se preocupar se são homogêneas. Segundo os autores, em vez de se tentar definir critérios de homogeneidade, o mais indicado é medir a variabilidade e tirar proveito dela.

Finalmente, a despeito da importância que devem merecer os processos de recomposição e reabilitação dos solos em áreas mineradas, a aplicação da geoestatística tem sido praticamente esquecida. Seu uso, basicamente, tem-se limitado no reconhecimento e estimativa dos fenômenos naturais, mas somente antes da exploração de minérios. Isso, de fato, causa certa estranheza, já que as técnicas geoestatísticas permitem separar mais racionalmente as unidades de manejo agrônomo no campo (Gurovich & Stern, 1983a). Carvallo e Gueyi (1983), por exemplo, desenvolveram trabalhos com variabilidade em duas áreas de solos minerais recuperados, concluindo diferentes níveis de variabilidade espacial entre cinco parâmetros de solo estudados, mas sem se utilizarem da geoestatística.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREAS DE ESTUDO

3.1.1 LOCALIZAÇÃO

As áreas de estudo localizam-se no município de São Mateus do Sul, sul do Estado do Paraná, a 140Km de Curitiba, com coordenadas geográficas $26^{\circ}52'$ de latitude sul e $50^{\circ}37'$ de longitude oeste (BRASIL, 1974).

Em número de três, essas áreas situam-se próximas à unidade industrial da Petrobras/SIX - Superintendência de Industrialização do Xisto, caracterizado-se por estarem duas em locais já submetidos a processos de mineração, separadas por aproximadamente 150m; e a terceira, com as características pedológicas ainda preservadas, próxima à frente de mineração, distante aproximadamente 2000m das demais áreas de estudo, a oeste. A figura 1 ilustra a localização regional e o local das áreas de estudo.

3.1.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

As três áreas de estudo estão localizadas fisiograficamente no segundo planalto paranaense, constituído de paisagens de relevo ondulado a suave ondulado, cortado por planícies aluviais (Maack, 1968).

O embasamento geológico é constituído por rochas

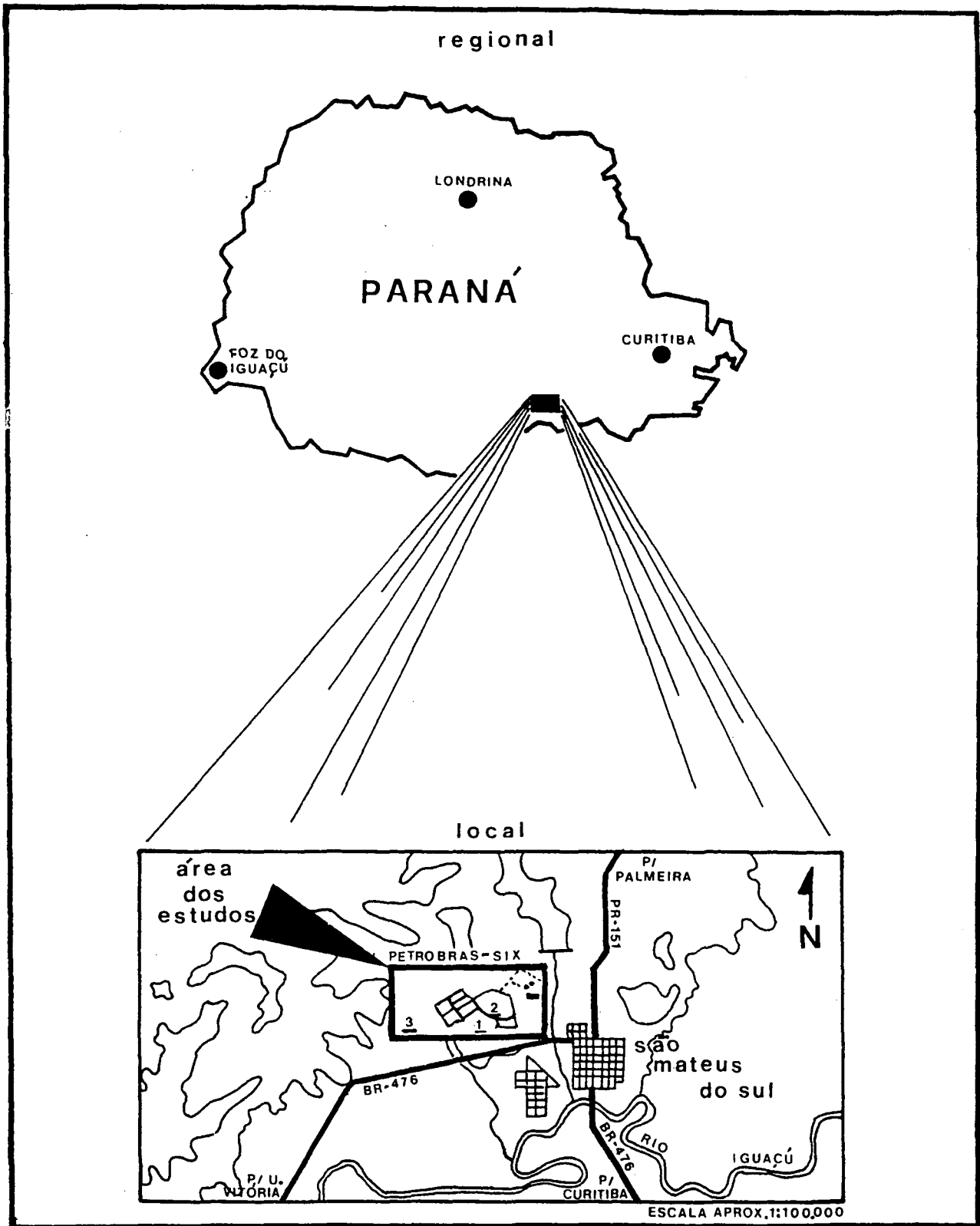


Figura 1. Localização regional e local das áreas de estudo.

sedimentares da Formação Irati e Serra Alta, do período Permiano, composto por folhelhos escuros com horizontes carbonosos ou perubituminosos fósseis, com ocorrência de freqüentes nódulos "chert" e camadas ou lentes de calcário, em geral dolomítico (EMBRAPA, 1984).

Situada a uma altitude média de 810m acima do nível do mar, a região apresenta clima Cfb, segundo a classificação de Koeppen: mesotérmico, úmido e superúmido, sem estação seca, com verões frescos e média do mês mais quente inferior a 22^oC, sendo as geadas severas e freqüentes (Maack, 1968; Godoy, 1976).

A média anual das temperaturas mínimas está entre as isothermas de 12 e 13^oC, e das máximas entre 23 e 24^oC, sendo que a média anual está na ordem de 17 a 18^oC. A precipitação média anual é de 1300mm (Godoy, 1976).

A vegetação primitiva na área é classificada como Floresta Umbrófila Mista, conforme nomenclatura adotada pelo projeto Radambrasil (IBGE, 1986). Caracterizava-se pela presença de espécies como pinheiro do Paraná (Araucária angustifolia), a imbúia (Ocotea porosa), a erva-mate (Ilex paraguariensis), o sassafráz (Ocotea pretiosa), entre outras.

O uso atual dos solos é caracterizado por atividades agrícolas que se concentram no plantio de culturas de subsistência como arroz, milho, feijão, mandioca e, ainda, num sistema agrosilvicultural específico para áreas com vegetação primária alterada, que consiste na exploração da erva-mate consorciada com pastagens (Souza et al., 1988).

As três áreas de interesse neste trabalho foram

escolhidas segundo critérios relativos ao processo de recomposição do solo. Enquanto Zamberlan e Viana (1988) se utilizam do termo "recuperação" para o processo de recobrimento do resíduo da mineração por "solo e argila", Box (1978) refere-se a este termo como uma condição da área submetida a degradação, em permitir que organismos semelhantes aos originais em número e composição venham novamente ocupá-la. Desta forma, o termo "recomposição" do solo será utilizado neste trabalho como o recobrimento do resíduo da mineração, por camadas de material resultante da remoção, transporte e redistribuição do solo original, sem contudo sofrer qualquer ação de recuperação de suas propriedades físicas, químicas e biológicas originais.

Além disso, Box (1978) emite um conceito sobre "reabilitação" do solo, como uma área anteriormente degradada, que alcançou um nível de produtividade previamente planejado, de características estáveis, mesmo que diferentes das originais. Este conceito foi adotado por Lucchesi (1988) e também neste trabalho.

ÁREA1 (ÁREA MINERADA EM REABILITAÇÃO): Trata-se de uma área já submetida ao processo de mineração pelo método de "lavra em tiras", descrito por Zamberlan e Viana (1988) onde, após as operações de retirada dos horizontes do solo por equipamentos pesados como "motoscrapers", foram transportados e relocados em camadas sobre os rejeitos da industrialização do xisto (xisto retortado). A espessura média das camadas de solo redistribuído sobre o rejeito foi de aproximadamente 2m, através da utilização de "motoscrapers" e com acabamento final efetuado com trator de

esteira D8. É importante ressaltar, entretanto, que nesse processo de reposição do solo não houve a preocupação de obedecer a distribuição original dos horizontes, ocorrendo uma mistura deles. O relevo, por outro lado, foi mantido suave ondulado, procurando oferecer condições básicas de drenagem e de redução de processos erosivos. Ainda, no sentido de minimizar os efeitos causados pelo trânsito de máquinas pesadas, o solo foi submetido a subsolagem a 75cm de profundidade, perpendicularmente ao declive do terreno, além de aração a 25cm de profundidade (Lucchesi, 1988).

O solo antrópico resultante desse processo de reposição originou-se, provavelmente, de solos classificados pela EMBRAPA (1984) como Associação Latossolo Vermelho Escuro Álico + Terra Bruna Estruturada Similar Álica, ambos com A proeminente, textura argilosa, fase floresta subtropical perenifólia, relêvo suave ondulado, representativo dos solos ocorrentes na frente de mineração.

Tanto Zamberlan e Viana (1988) como Lucchesi (1988), reconhecem a baixa fertilidade e as limitações físicas desses solos, impossibilitando a sua utilização imediata para fins produtivos.

Em maio de 1986, iniciaram-se as práticas de reabilitação da área por Lucchesi (1988), através da sucessão de culturas forrageiras, objetivando avaliar sua influência sobre a recuperação de algumas características nessa área. Dando continuidade aos experimentos, Souza et al. (1989), avaliaram os níveis de reabilitação da área, para fins agropastoris, utilizando-se de parâmetros de produção de milho.

ÁREA 2 (ÁREA MINERADA NÃO REABILITADA): Trata-se de uma área também submetida ao processo de mineração pelo método de "lavra em tiras", como descrito por Zamberlan e Viana (1988). Por outro lado, embora essa área também apresentasse, presumivelmente, a mesma associação de solos da área 1, elas diferem entre si quanto a metodologia de reposição do solo sobre os rejeitos da industrialização do xisto.

Com a preocupação de se reduzir os efeitos da compactação intensificados pelo uso de equipamentos pesados, foram utilizados equipamentos mais leves como caminhões basculantes e tratores menores nos trabalhos de remoção e redistribuição dos horizontes de solo. Houve, também, o cuidado de se proceder a separação dos horizontes superficiais (A e B) do horizonte inferior (C), tanto na remoção como na reposição ou redistribuição, procurando prevenir maiores alterações nas características originais.

O relevo foi restaurado para suave ondulado e, no sentido de promover uma redução da compactação do solo e uma melhor drenagem, em profundidade, foi efetuada a subsolagem a 75cm. Posteriormente, através do uso de motoniveladora, foram construídos terraços de base larga, com objetivo de melhor controlar os processos erosivos superficiais. Por fim, foi realizada uma aração de 25cm de profundidade, com objetivo de preparar o solo para incorporação de corretivos e adubos, seguida de gradagem. Essas operações, nessa área, findaram no início do ano de 1988.

ÁREA 3 (ÁREA NÃO MINERADA): Trata-se de uma área com suas características pedológicas ainda preservadas na forma original, livre de qualquer atividade agrícola. A cobertura vegetal é constituída por gramíneas nativas de porte rasteiro, típicas de áreas sombreadas. Como vegetação de porte superior, são encontradas algumas espécies remanescentes da vegetação primitiva, como o pinheiro do Paraná e a imbuía.

O uso atual da área é caracterizado como um sistema típico da região, descrito por Souza et al. (1989) como consórcio de mata com pastagens, de forma extensiva. Os mesmos autores classificaram o solo dessa área como Latossolo Vermelho Escuro Álico, pouco profundo, A moderado, textura muito argilosa, fase floresta subtropical perinifólia, com relevo suave ondulado.

3.2 AMOSTRAGENS

3.2.1 METODOLOGIA

Nos meses de maio, outubro e dezembro de 1988, foi alocada uma transeção em cada uma das áreas, todas orientadas segundo a direção $71^{\circ}13'30''\text{NO}$. No campo, essas transeções foram demarcadas através de estacas fixadas nos seus limites extremos, sustentando uma linha de "nylon" estirada. Na área 1 a transeção foi de 10m de comprimento, junto a uma linha de plantas de milho, a qual fazia parte de um experimento instalado por Souza et al. (1989). A orientação espacial dessa linha de

plantas foi utilizada como referência na alocação das transeções nas outras duas áreas, todavia, ambas com 100m de comprimento.

Através da fixação de fitas adesivas ao longo das linhas de "nylon", foram identificados 51 pontos de amostragens nas transeções de cada uma das três áreas, todos regularmente espaçados de 20cm. Além disso, nas áreas 2 e 3, outras 51 fitas adesivas coloridas foram fixadas em intervalos regulares de 200cm, ambas com seus pontos centrais coincidentes àqueles espaçados de 20cm. Definiram-se, com isso, 51 pontos de amostragens com intervalos de 20cm nas três áreas, e outros 51 com intervalos de amostragens de 200cm nas áreas 2 e 3. A figura 2A mostra, esquematicamente, a posição e orientação de cada transeção em sua respectiva área e a figura 2B os intervalos de amostragens considerados em cada transeção a partir de um ponto central tomado como referência arbitrária.

3.2.2 PARÂMETROS AVALIADOS

Os parâmetros de solo e planta avaliados, foram os seguintes:

3.2.2.1 DE SOLO

A mistura de diferentes horizontes e a compactação do solo em área minerada pelo emprego de veículos, máquinas e implementos pesados, podem resultar em graves limitações no processo de reabilitação desses solos, além de, presumivelmente,

poderem promover alterações na estrutura espacial de suas propriedades físico-químicas. Desde que algumas dessas propriedades possam ser alteradas de forma diferenciada, foram escolhidas algumas das propriedades físicas do solo mais indicativas desse processo, quais sejam: umidade gravimétrica, massa específica do solo, massa específica das partículas, porosidade total, textura (areia, silte e argila), e armazenamento de água. Além destes parâmetros físicos, foi considerado, ainda, o pH do solo, mas somente na transeção da área 1.

3.2.2.2 DE PLANTA

Como parâmetro de desenvolvimento de plantas de milho, foi considerado unicamente para a área 1 (minerada, em processo de reabilitação), a estrutura espacial de suas alturas, por considerar que esse parâmetro é resultante da interação de propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. As plantas foram semeadas em dezembro de 1988, após a área ter sido corrigida e adubada, utilizando-se sementes de milho híbrido, variedade AG301 (Souza et al. 1989), em sucessão a culturas forrageiras implantadas por Lucchesi (1988). O espaçamento entre plantas na linha foi de 20cm.

3.2.3 COLETAS DE CAMPO

3.2.3.1 DE SOLO

A coleta de amostras de solo para análise daqueles

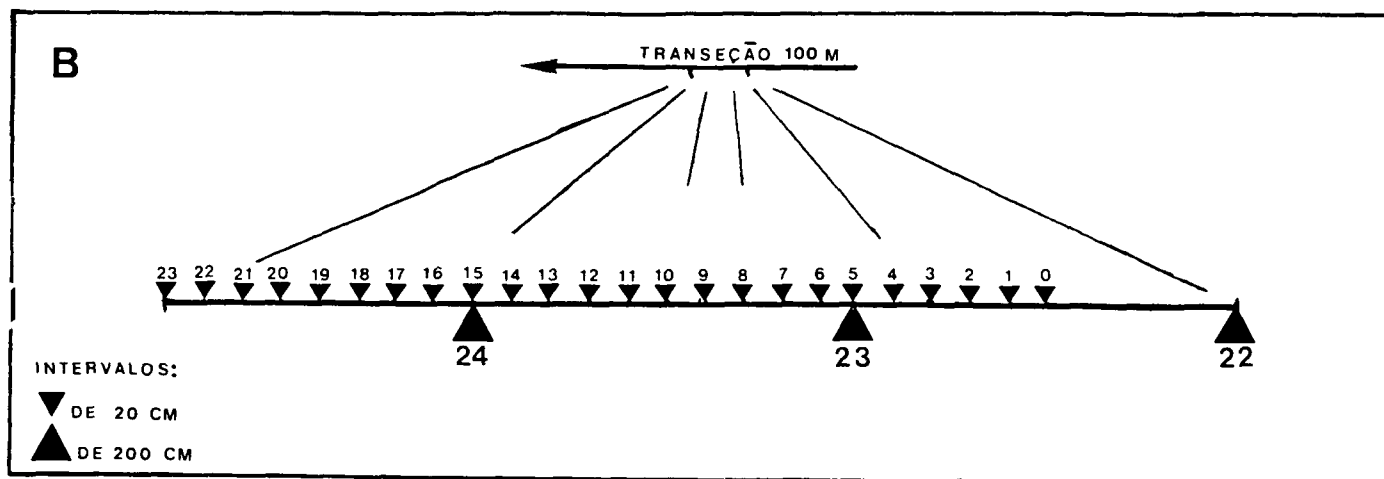
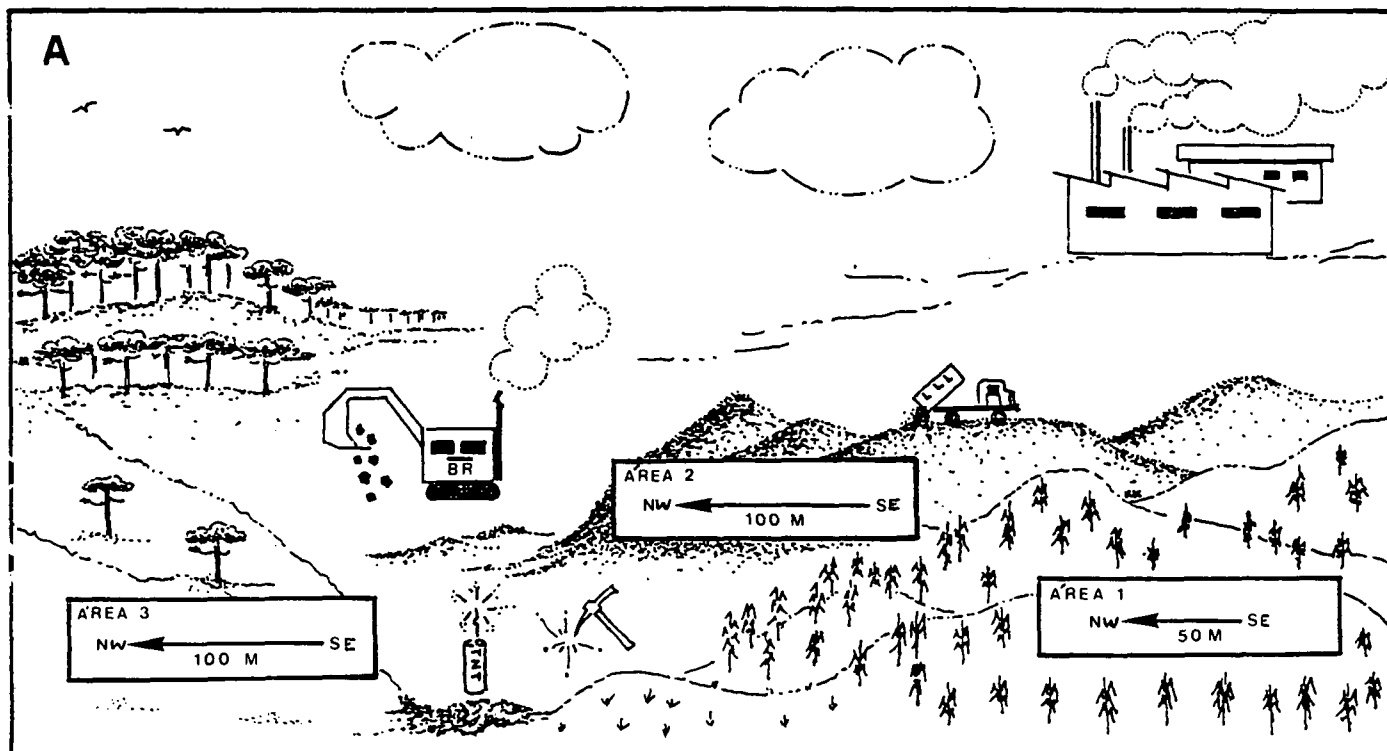


Figura 2. Ilustração esquemática da posição e orientação de cada transeção em sua respectiva área (A) e dos intervalos de amostragem para um trecho de uma das transeções (B).

parâmetros citados nos dois itens anteriores, obedeceu a locação prévia dos pontos de amostragens, de acordo com a orientação e o intervalo entre amostras, também previamente identificados ao longo de cada transeção (ver item 3.2.1). A metodologia de coleta, que teve por objetivo a obtenção dos valores médios para todos os parâmetros até a profundidade de 30cm, foi a seguinte:

(i) utilizando-se de trado "holandês", procedeu-se a retirada de amostras para determinação da umidade atual do solo, até a profundidade de 30cm. Essas amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, identificadas e imediatamente destinadas ao laboratório da Petrobras-SIX, para obtenção das respectivas massas úmidas e secas, essas últimas após permanecerem em estufa a 110⁰C, até obtenção da condição de massa constante.

(ii) de igual forma, procedeu-se a coleta de amostras de solo para a análise granulométrica, da massa específica de partículas e do pH (esse somente na transeção da área 1), tradando-se nas vizinhanças dos orifícios da coleta anterior, como mostra o esquema da figura 3.

(iii) para a coleta de amostras não deformadas, visando a determinação da massa específica do solo, foi aberta uma pequena trincheira, frontalmente à linha da transeção. Anéis metálicos, com dimensões de 5cm de diâmetro e 3cm de altura, foram então introduzidos no solo com auxílio de uma macaco mecânico de automóvel, a fim de se evitar distorções por ocasião da introdução dos anéis durante as amostragens. Essas coletas foram feitas em duas profundidades, isto é, nos pontos médios entre 0-15cm e 15-30cm, sendo que os valores determinados foram assumidos como

representativos das respectivas camadas.

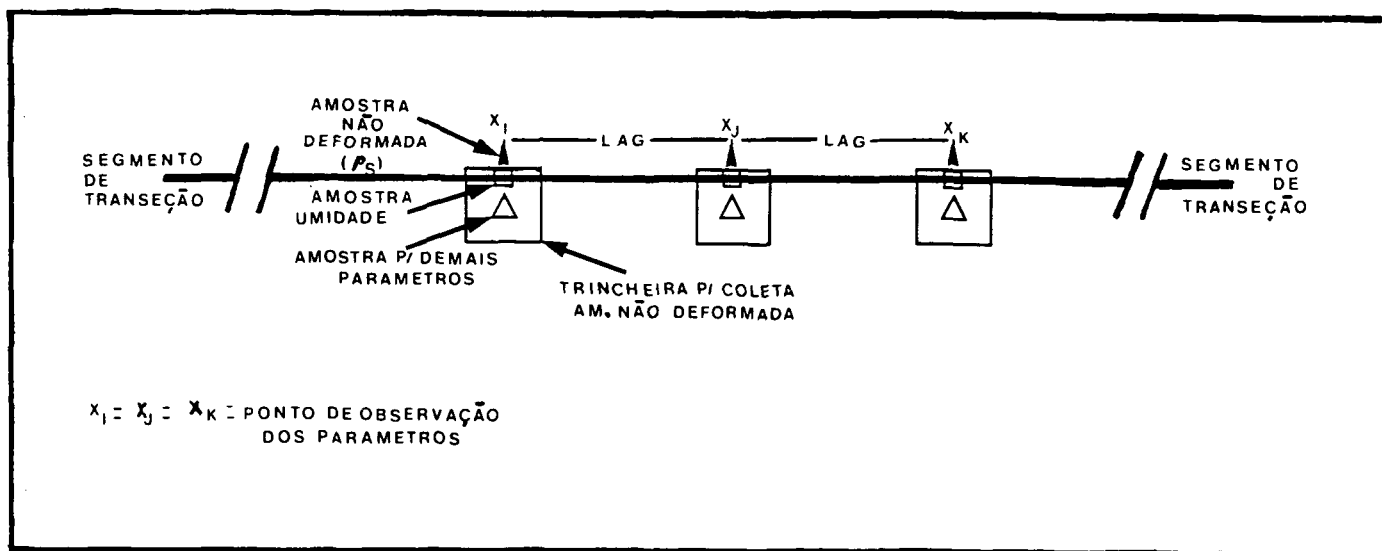


Figura 3. Representação esquemática dos pontos de coleta de amostras de solo na transeção.

3.2.3.2 DE PLANTA

Em meados de maio de 1988, por ocasião da colheita de milho na área 1, as alturas das plantas foram determinadas ao longo da transeção, com intervalos de 20cm. Essa medida foi feita considerando a distância entre o nível do solo até a extremidade da panícula mais alta.

3.3 ANÁLISES DE LABORATÓRIO

3.3.1 DE SOLO

(i) UMIDADE GRAVIMÉTRICA ATUAL (U): foi determinada através da equação:

$$U = \frac{\text{massa úmida} - \text{massa seca}(110^{\circ}\text{C})}{\text{massa seca}(110^{\circ}\text{C})} \quad (\text{g/g}) \quad (7)$$

(ii) MASSA ESPECÍFICA DO SOLO SECO (ρ_s): foi determinada a partir da massa seca (110°C) ocupada no anel volumétrico utilizado na coleta de cada amostra, através da equação:

$$\rho_s = \frac{\text{massa seca}(110^{\circ}\text{C})}{\text{volume do anel}} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (8)$$

(iii) MASSA ESPECÍFICA DAS PARTÍCULAS (ρ_p): foi determinada de acordo com a metodologia descrita pela EMBRAPA (1979), utilizando balões volumétricos de 50ml e álcool etílico para a determinação do volume de sólidos, através da equação:

$$\rho_p = \frac{\text{massa seca}(110^{\circ}\text{C})}{\text{volume de sólidos}} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (9)$$

(iv) POROSIDADE TOTAL (α): foi determinada a partir dos valores de ρ_p e dos valores de ρ_s , estes últimos considerando a média aritmética daqueles obtidos nas camadas de 0-15cm e 15-30cm,

através da equação:

$$\alpha = 1 - \frac{\frac{\rho_s(0-15) + \rho_s(15-30)}{2}}{\rho_p} \quad (\text{cm}^3/\text{cm}^3) \quad (10)$$

(v) GRANULOMETRIA: foi determinada pelo método da pipeta, de acordo com a metodologia descrita pela EMBRAPA (1979).

(vi) ARMAZENAMENTO DE ÁGUA (A): foi determinado para a camada 0-30cm, a partir dos valores de U e dos respectivos valores médios de ρ_s das camadas de 0-15 e 15-30cm, através da equação:

$$A = \left\{ U \frac{\frac{\rho_s(0-15) + \rho_s(15-30)}{2}}{\rho_{\text{água}}} \right\} z \quad (\text{cm}) \quad (11)$$

onde z é a espessura da camada considerada que, no caso, foi de 30cm; e $\rho_{\text{água}}$ é a massa específica da água, considerada valendo $1\text{g}/\text{cm}^3$.

(vii) pH DO SOLO (EM ÁGUA): foi determinado a partir de uma suspensão de solo-água, na proporção de 10ml de solo para 25ml de água desionizada, de acordo com a metodologia descrita por EMBRAPA (1979).

3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados dos parâmetros estudados foram analisados e interpretados a partir das funções autocorrelação e crosscorrelação, através de um programa computacional estatístico denominado STATGRAPHICS-Statistical Graphics System, versão 2.3, desenvolvido pela STSC, Inc. e Statistical Graphics Corporation, USA (1987). Outros parâmetros estatísticos como média, desvio padrão, variância, coeficiente de variação e análise de regressão, também foram realizadas com auxílio desse programa.

3.4.1 AUTOCORRELAÇÃO

A autocorrelação é um processo de "auto-comparação" que expressa a correlação linear entre uma série espacial (ou temporal) e a mesma série num intervalo de espaço (ou tempo), onde se procura definir a distância (ou tempo) de separação entre observações além da qual não existe correlação entre pares de valores (Libardi et al. 1986). A função autocorrelação é definida por (Warrick & Nielsen, 1980):

$$r_h = c_h / (s)^2 \quad (12)$$

com

$$c_h = (1/(n-h-1)) \sum_{i=1}^{n-h} (x_i - m)(x_{i+h} - m) \quad (13)$$

e

$$s = \left(\sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 / (n - 1) \right)^{1/2} \quad (14)$$

onde r_h = coeficiente de autocorrelação no "lag" h;
 m = média ($m = \sum_{i=1}^n x_i/n$); e
 s = desvio padrão dos n valores observados

A relação funcional gráfica dos valores de r_h em função dos "lags", chama-se autocorrelograma.

O uso da função autocorrelação implica em certas hipóteses matemáticas, em particular, a forma da estacionaridade. Segundo Gajem et al. (1981), se o valor de um parâmetro num local p é representado por uma função X(p), então essa função será estacionária se para qualquer m pontos p_1, \dots, p_m a distribuição conjunta de $X(p_1), \dots, X(p_m)$ for invariante com respeito a translações, isto é, a distribuição de $X(p_1+h), \dots, X(p_m+h)$ é a mesma para qualquer h. Ao se usar a autocorrelação, sempre deve ser lembrado que se está modelando um determinado parâmetro de interesse por uma função ao acaso com propriedades suficientes para assegurar a existência da função autocorrelação. A validade dessas hipóteses geralmente não pode ser testada satisfatoriamente e pode depender da área ou do volume da região modelada. A estacionaridade, em particular, é freqüentemente uma questão de escala, seja da região ou dos intervalos de amostragens (Gajem et al. 1981).

3.4.2 CROSSCORRELAÇÃO

Segundo Reichardt et al. (1986), se mais de uma propriedade for medida de forma regionalizada pode-se, também, obter-se a função crosscorrelação. Embora na crosscorrelação se

correlacionem duas variáveis distintas, o processo de cálculo é o mesmo da autocorrelação. Por outro lado, segundo Prevedello (1986), enquanto a variância é usada no denominador da equação da autocorrelação e é constante para todos os "lags", na crosscorrelação não se pode esperar variâncias constantes para ambas as séries, especialmente quando uma delas é menor do que a outra.

Tal como na autocorrelação, a relação funcional gráfica dos valores dos coeficientes de crosscorrelação em função dos "lags", chama-se crosscorrelograma.

Neste trabalho, enquanto foram obtidos os autocorrelogramas de todos os parâmetros levantados, para os crosscorrelogramas somente alguns foram confeccionados, isto é, somente daqueles parâmetros que indicavam estrutura espacial e que sugeriam a verificação da correlação espacial entre eles.

3.5 ERROS DE LABORATÓRIO

Para quantificar os efeitos dos erros laboratoriais nas variações de campo, foi definido uma "precisão relativa", como:

$$\text{precisão relativa} = [(s^2 - s_m^2)/s^2] (100\%) \quad (15)$$

onde s_m^2 é a variância medida dos valores determinados em laboratório mediante o uso de repetições de uma mesma amostra e s^2 a variância dos valores observados em campo. Se os erros de laboratório são grandes, a precisão será baixa em relação à

variância medida em campo. Isso evidencia a importância de se conhecer os erros cometidos, porque se a variância de um conjunto de dados medidos em laboratório é grande em relação à variância de campo, não há razões de se estudar a variabilidade para aquela propriedade porque ela pode estar sendo dominada por outros fatores.

O quadro 1 apresenta alguns parâmetros estatísticos para ρ_p , porcentagens de areia, silte e argila, e do pH, para 6 repetições. Essas repetições foram representativas de sub-amostras coletadas no campo.

Quadro 1. Sumário de alguns parâmetros estatísticos das determinações em laboratório.

parâmetro	n° de repetições	média	variância	coef. variação
ρ_p (g/cm ³)	6	3,0565	1,107E-4	% 0,34
areia (%)	6	4,92833	4,16667E-4	0,41
silte (%)	6	19,7067	3,86667E-4	0,10
argila (%)	6	75,365	1,15E-3	0,04
pH	6	4,41667	9,66667E-3	2,23

Os erros laboratoriais em relação à variabilidade nas transeções são discutidos no capítulo seguinte.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ÁREA 3 (NÃO MINERADA)

O quadro 2 mostra alguns resultados estatísticos da umidade gravimétrica (U), massa específica do solo (ρ_s), massa específica das partículas (ρ_p), areia, silte, argila, armazenamento de água (A) e porosidade total (α) dos primeiros 30cm de profundidade do solo na transeção da área 3 (não minerada), para os dois espaçamentos entre amostragens.

Quadro 2. Alguns resultados estatísticos de U, ρ_s , ρ_p , areia, silte, argila, A e α dos primeiros 30cm de profundidade do solo na transeção de 100m de comprimento da área 3, para os dois espaçamentos entre amostragens.

	U	ρ_s (0-15) g/cm ³	ρ_s (15-30) g/cm ³	ρ_p g/cm ³	areia %	silte %	argila %	A cm	α cm ³ /cm ³
ESPAÇAMENTO ENTRE AMOSTRAGENS=20cm									
MÉDIA	37,37	1,063	1,096	2,906	4,55	18,16	77,30	12,11	0,628
MIN.	21,44	0,953	0,911	2,563	3,54	7,15	67,27	6,58	0,577
MAX.	41,88	1,246	1,259	3,118	6,90	25,87	89,11	14,55	0,664
A.V.	20,44	0,293	0,348	0,555	3,36	18,72	21,84	7,97	0,087
D.P.	3,734	5,7E-2	7,3E-2	9,0E-2	7,4E-1	4,09	4,39	1,39	1,8E-2
C.V.	9,991	5,325	6,694	3,099	16,28	22,53	5,68	11,45	2,874
ESPAÇAMENTO ENTRE AMOSTRAGENS=200cm									
MÉDIA	40,32	1,070	1,089	2,981	3,69	15,22	81,09	13,06	0,638
MIN.	32,90	0,908	0,925	2,775	1,65	7,34	64,10	10,41	0,588
MAX.	47,48	1,208	1,192	3,250	5,35	32,06	89,24	16,57	0,690
A.V.	14,58	0,300	0,267	0,455	3,70	24,72	25,14	6,16	0,102
D.P.	3,64	6,1E-2	7,2E-2	9,0E-2	9,3E-1	5,36	5,80	1,50	2,1E-2
C.V.	9,03	5,659	6,613	3,002	25,25	35,21	7,15	13,06	3,277

A.V.= amplitude de variação;D.P.= desvio padrão;C.V.= coeficiente de variação

Como se observa, com exceção da areia, a amplitude de variação, o desvio padrão e o coeficiente de variação cresceram com o aumento dos intervalos entre amostragens. Em termos médios, o desvio padrão dos parâmetros espaçados de 200cm na transeção foram cerca de 1,7 vezes maiores que daqueles encontrados para o espaçamento de 20cm. Isso, evidentemente, significa que as variâncias desses foram quase 3 vezes maiores que daqueles. Situação semelhante foi observada por Gajem et al. (1981) para uma série de parâmetros do solo com diferentes intervalos entre medidas na transeção, onde baixas variâncias corresponderam a transeções curtas e maiores variâncias em transeções longas. Além disso, eles também observaram que as zonas de influência calculadas a partir dos autocorrelogramas foram fortemente dependentes dos intervalos entre amostragens, com largos intervalos resultando em maiores valores.

Para quantificar os efeitos dos erros cometidos em laboratório frente às variações de campo, foi utilizado o conceito de precisão relativa, definida pela equação (15), mostrada no item 3.5, juntamente com os valores de variâncias apresentadas nos quadros 1 e 2. O quadro 3 mostra esses resultados para ρ_p , areia, silte e argila, onde se observa que a precisão das medidas em laboratório podem ser consideradas altamente satisfatórias, indicando que as variâncias dos dados de campo pouco se devem a erros laboratoriais, podendo ser interpretadas como uma ocorrência predominantemente espacial.

As figura 4 a 12 mostram, respectivamente, os autocorrelogramas para U, $\rho_s(0-15)$, $\rho_s(15-30)$, ρ_p , areia, silte,

Quadro 3. Precisão relativa, em porcentagem, dos parâmetros ρ_p , areia, silte, e argila na transeção da área 3, para os dois espaçamentos entre amostragens.

PARÂMETRO	ESPAÇAMENTO=20cm	ESPAÇAMENTO=200cm
ρ_p	98,46	98,98
areia	99,85	99,79
silte	99,99	100,00
argila	99,97	99,99

argila, A e α , quando os espaçamentos de amostragens na transeção foi de 20cm, e as figuras 13 a 21 os autocorrelogramas das mesmas propriedades, quando o espaçamento entre amostragens foi de 200cm. Nessas figuras, a altura de cada barra representa o valor do coeficiente de autocorrelação e as linhas pontilhadas, acima e abaixo do zero, indicam o dobro do erro padrão para cada coeficiente. Essas linhas são usadas para determinar o "lag" além do qual todas as correlações não são significativamente diferentes de zero (STATGRAPHICS, 1987). Com isso, as figuras 5, 6, 11 e 12 mostram, respectivamente, que os valores de ρ_s (de ambas camadas), armazenamento e porosidade total, foram espacialmente independentes entre si, quando o espaçamento de amostragens foi de 20cm. Para as demais propriedades, já se nota uma certa estrutura de dependência, mais acentuadamente para ρ_p e areia (figuras 7 e 8), que pode ter sua origem nos processos pedogenéticos. Por outro lado, quando se observam as figuras 13 a 21, verifica-se que o aumento do espaçamento entre amostras para 200cm resultou numa mudança na estrutura espacial das propriedades, com exceção de $\rho_s(0-15)$ e α , que se mantiveram isentas de estrutura (figuras 14 e 21). Essas mudanças na estrutura espacial em função do espaçamento

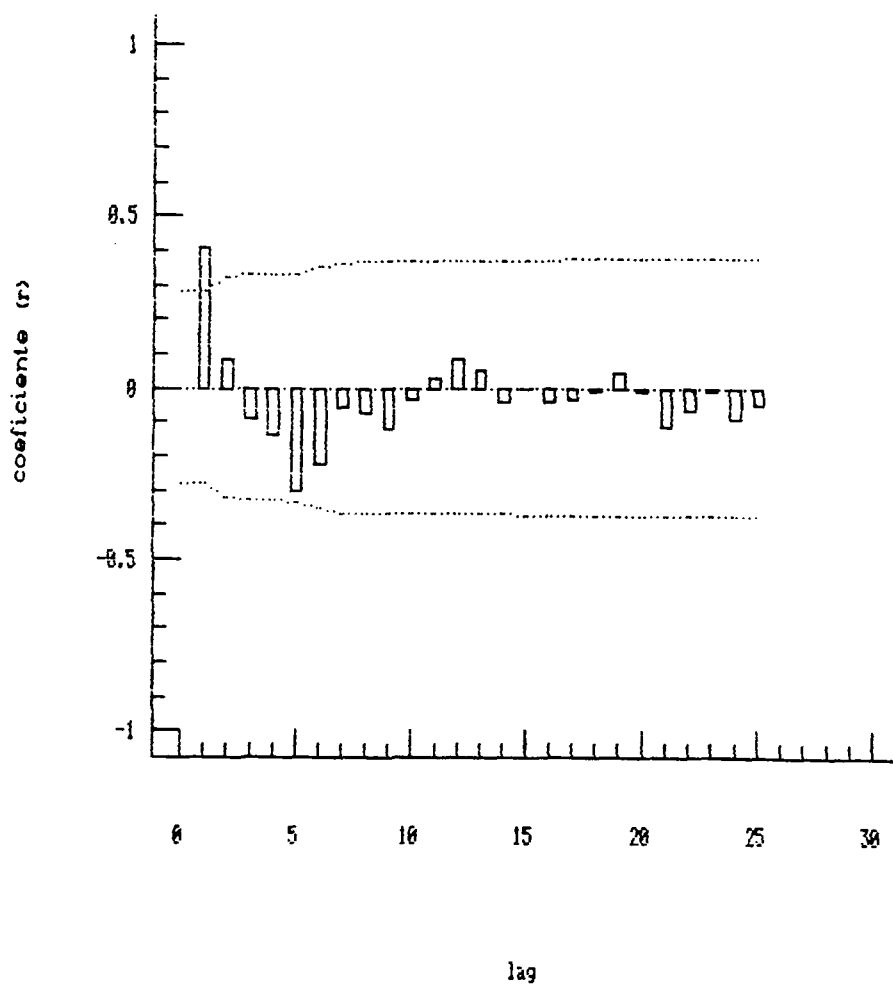


Figura 4. Correlograma da umidade gravimétrica (U) da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

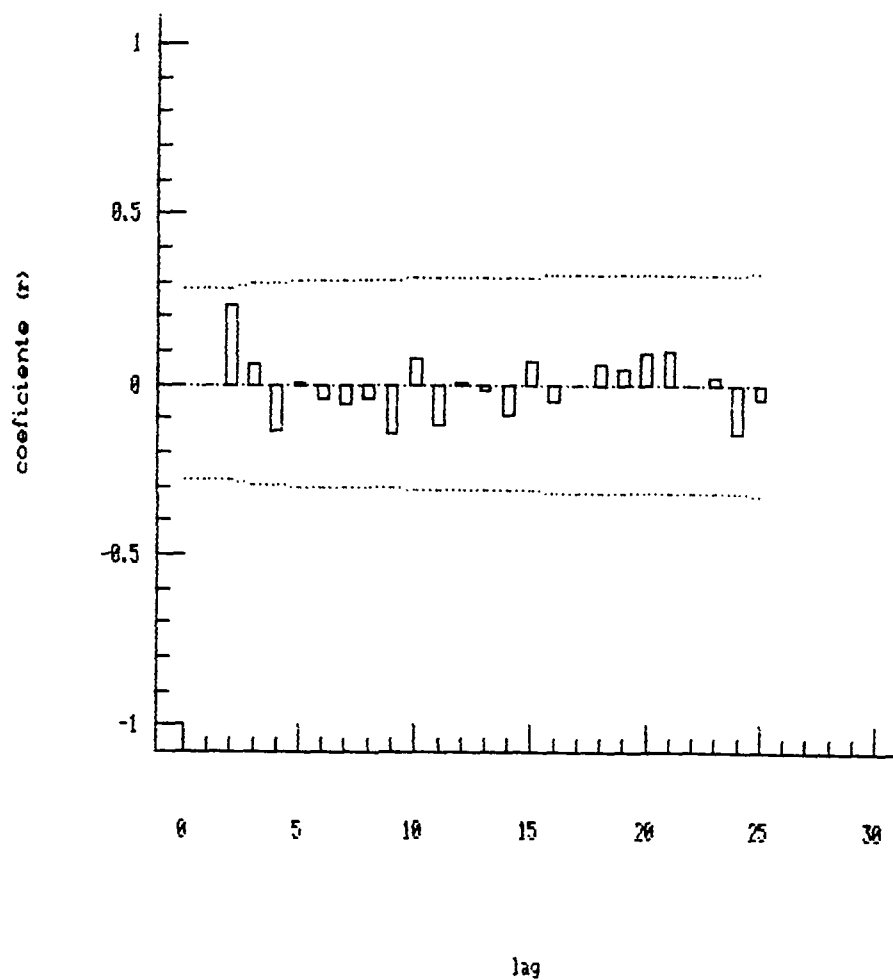


Figura 5. Correlograma da massa específica do solo da camada de 0-15cm [$\rho_s(0-15)$] na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

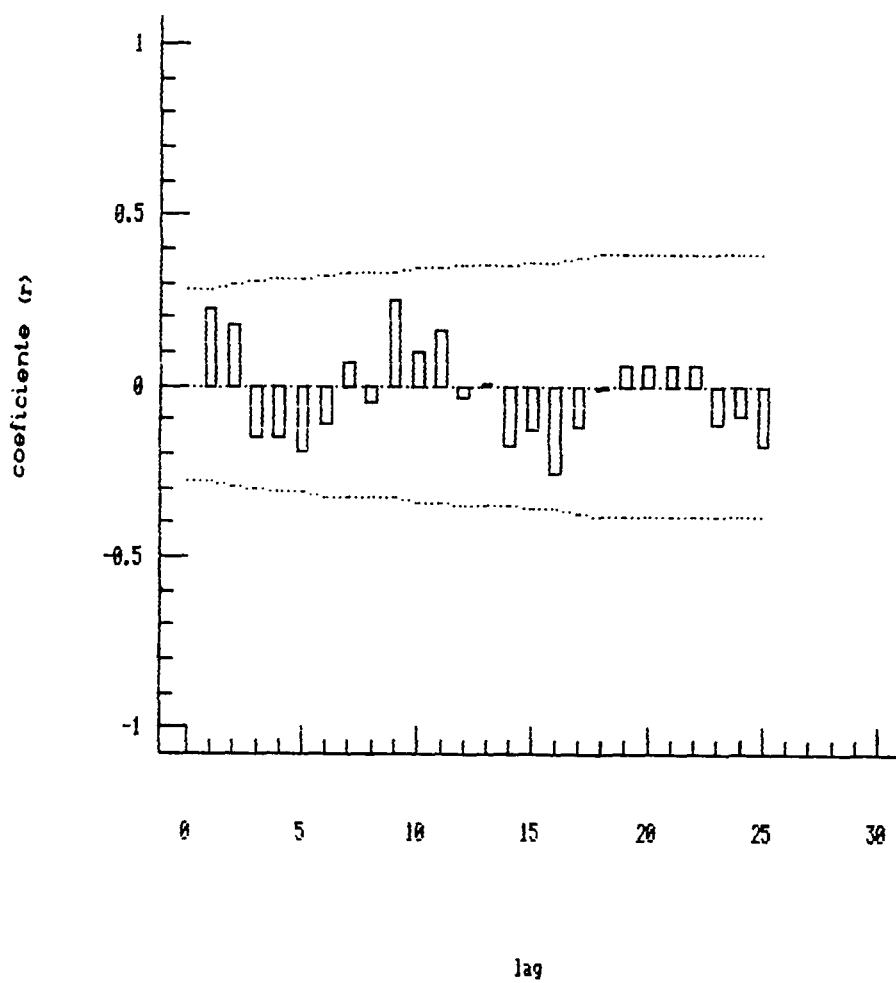


Figura 6. Correlograma da massa específica do solo da camada de 15-30cm [$\rho_s(15-30)$] na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

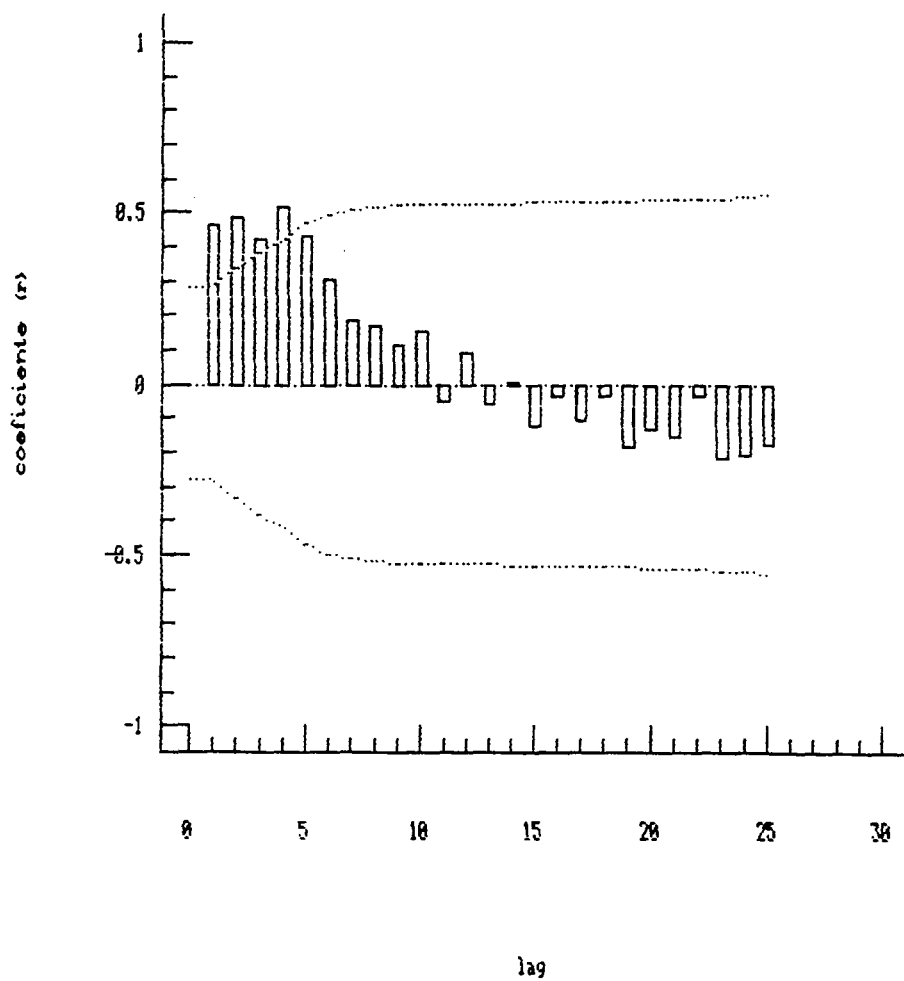


Figura 7. Correlograma da massa específica das partículas da camada de 0-30cm(ρ_p) na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 20cm(1"lag"=20cm).

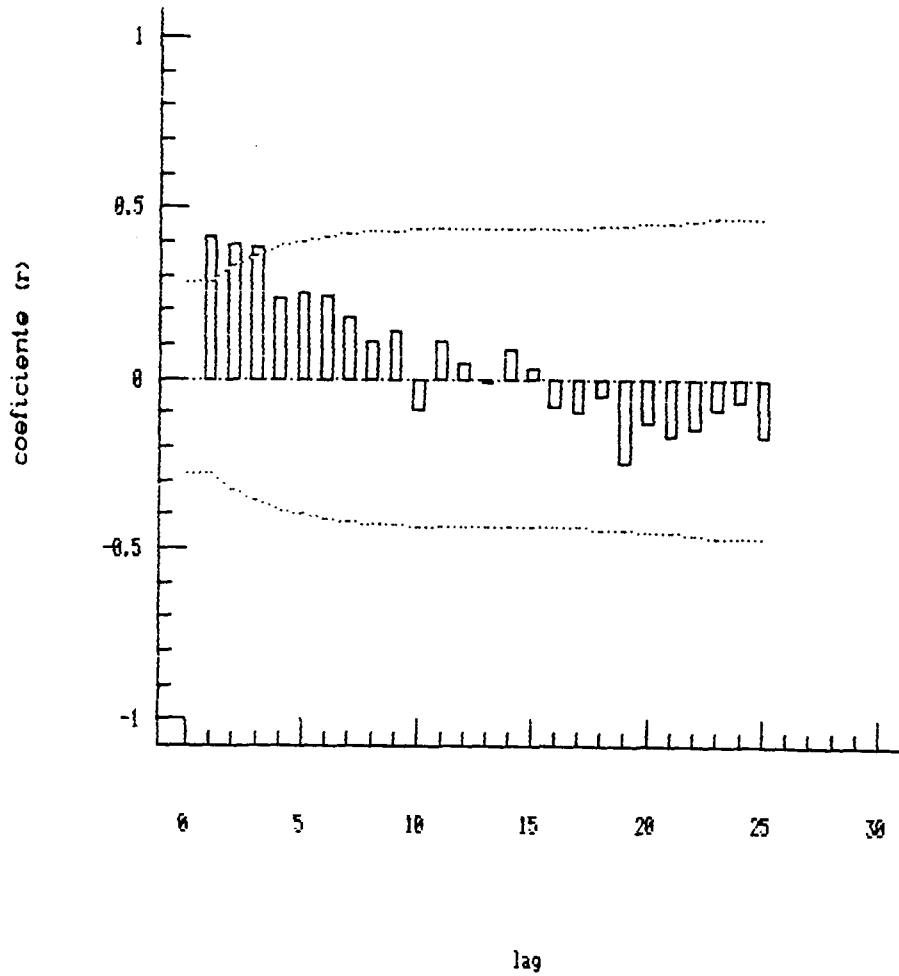


Figura 8. Correlograma da porcentagem de areia da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

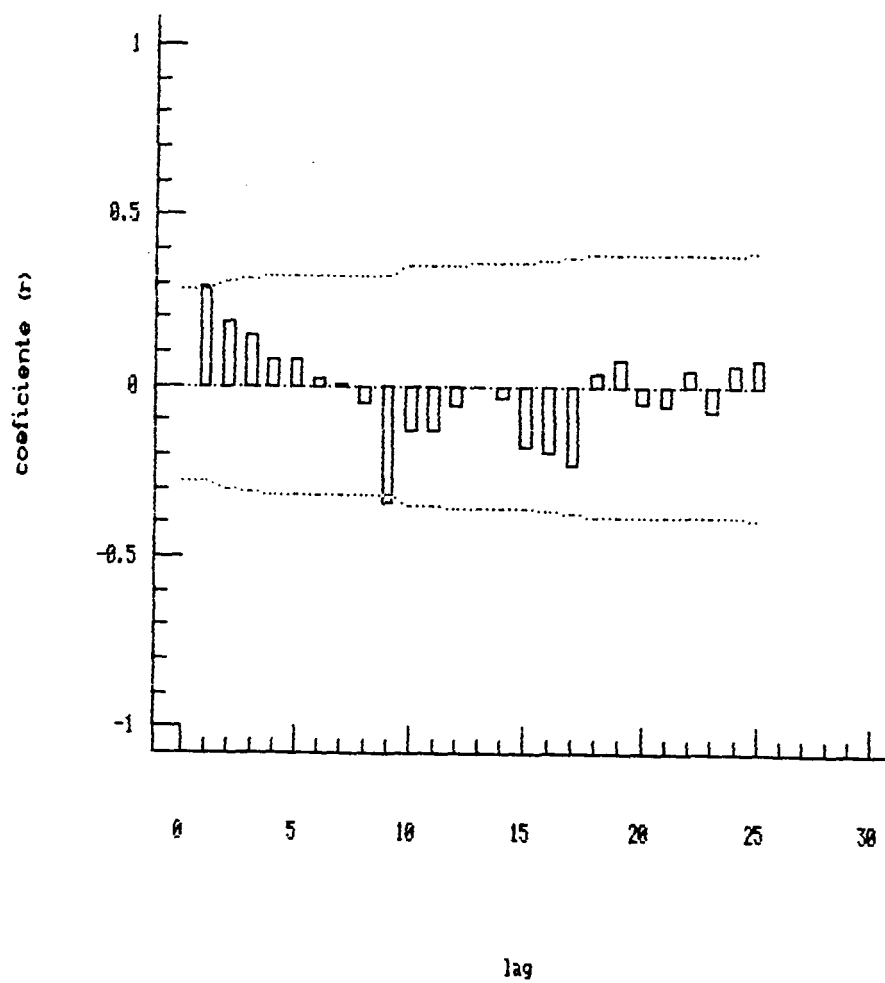


Figura 9. Correlograma da porcentagem de silte da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

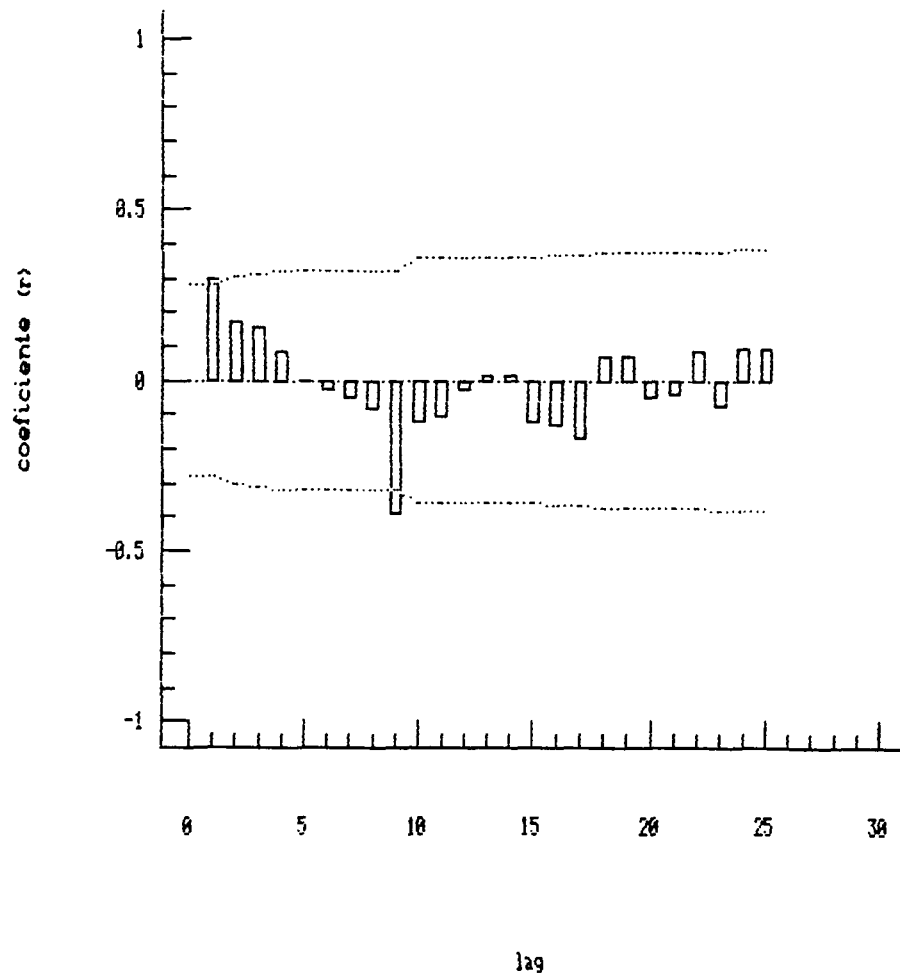


Figura 10. Correlograma da porcentagem de argila da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

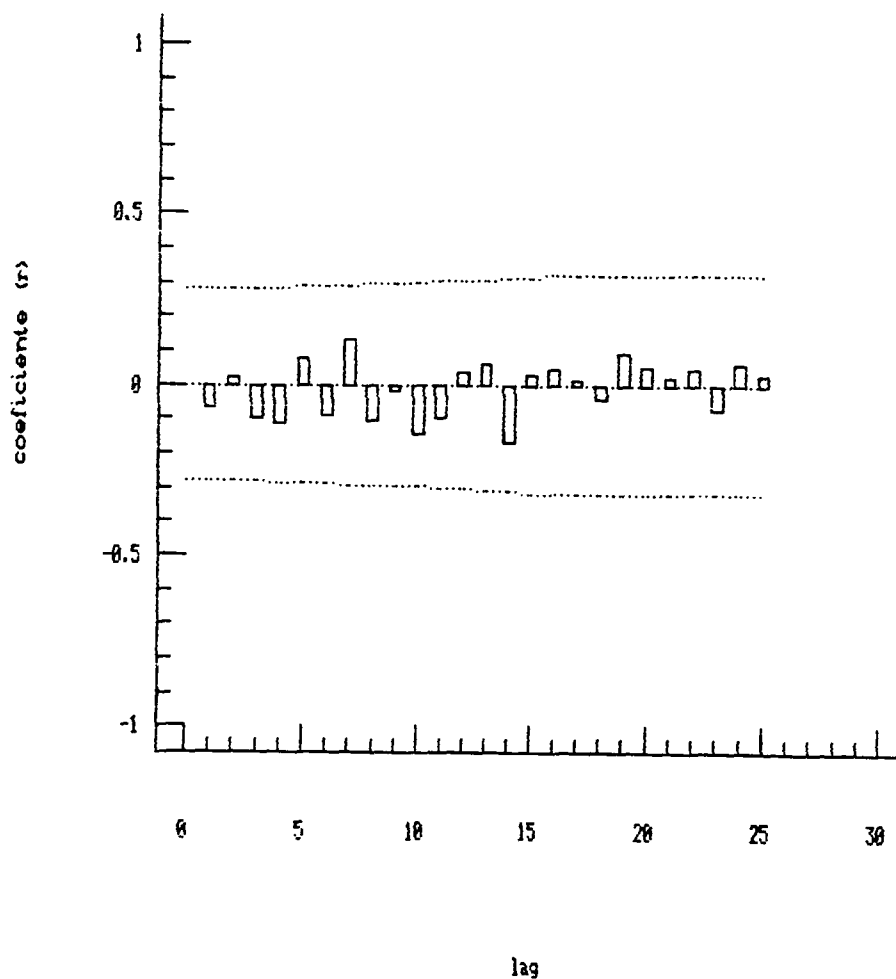


Figura 11. Correlograma do armazenamento de água (A) da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

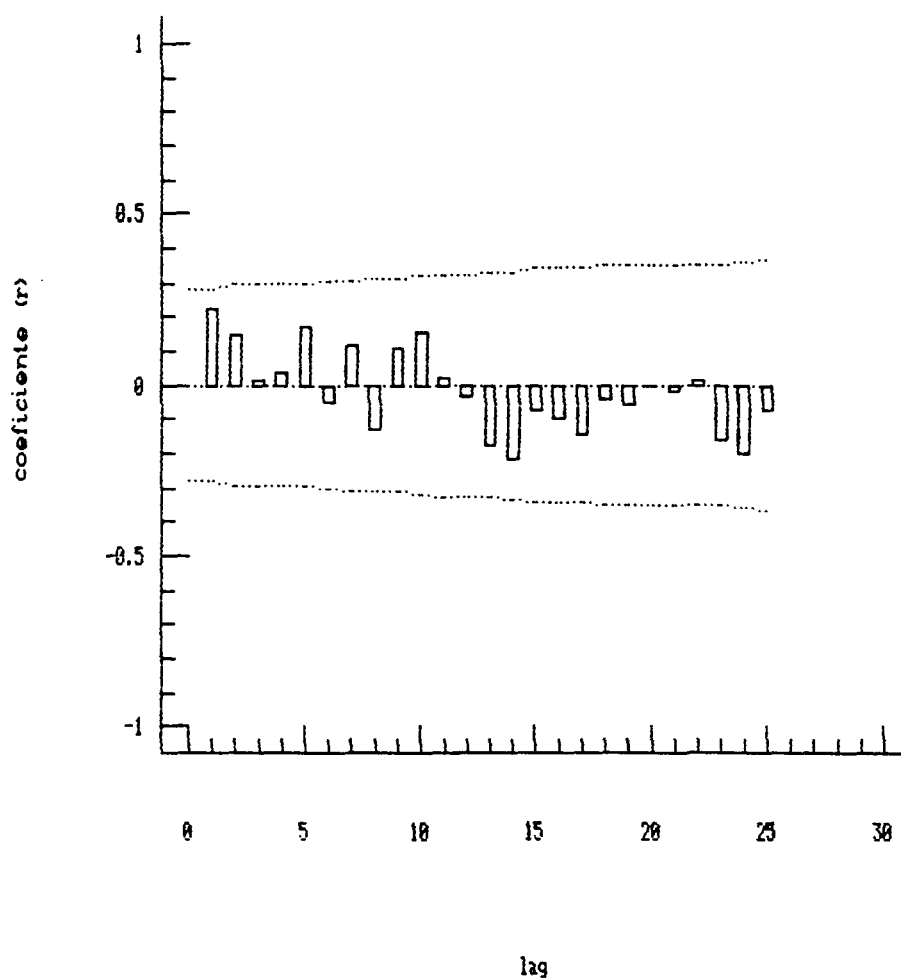


Figura 12. Correlograma da porosidade total (α) da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

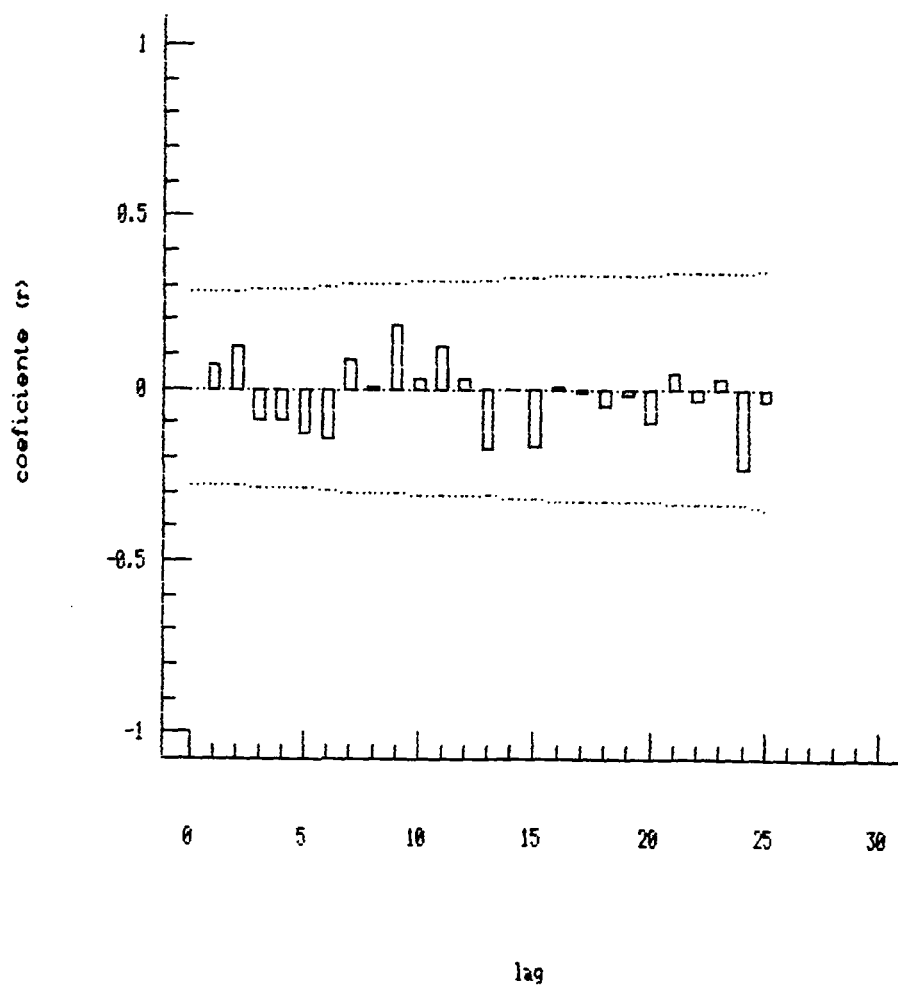


Figura 13. Correlograma da umidade gravimétrica (U) da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).

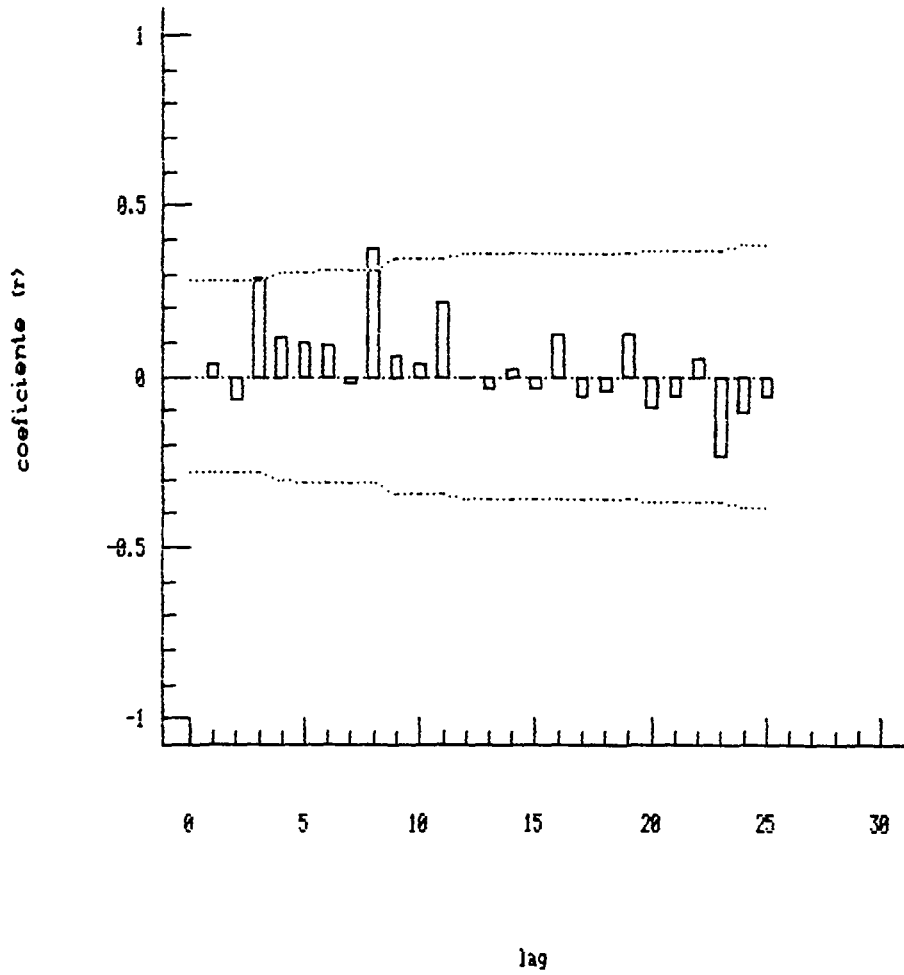


Figura 14. Correlograma da massa específica do solo da camada de 0-15cm [$\rho_s(0-15)$] na transeção da área 3, com espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).

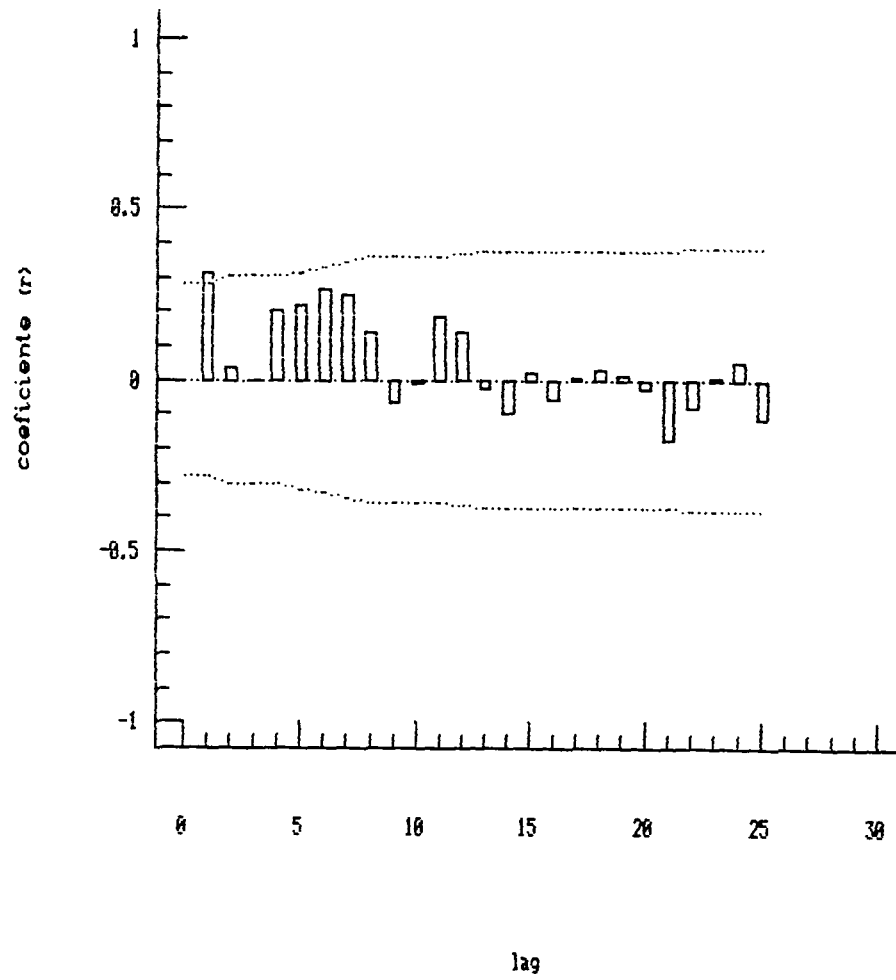


Figura 15. Correlograma da massa específica do solo da camada de 15-30cm [$\rho_s(15-30)$] na transeção da área 3, espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).

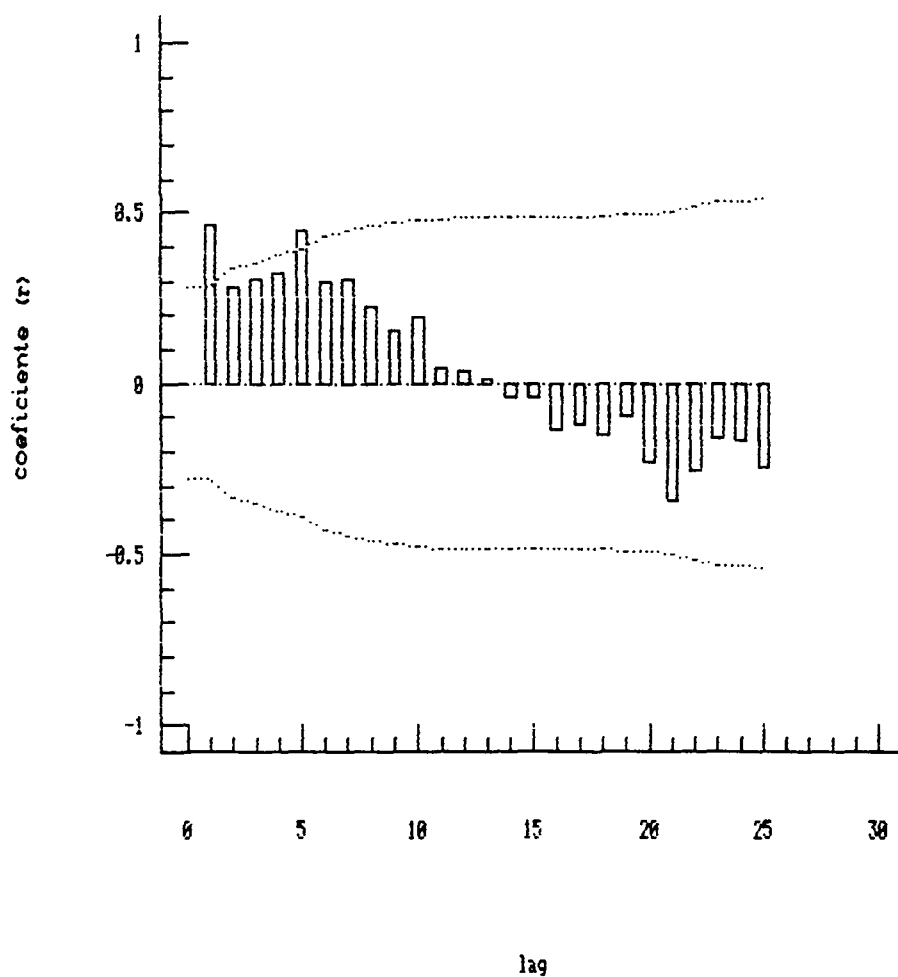


Figura 16. Correlograma da massa específica das partículas da camada de 0-30cm (ρ_p) na transeção da área 3, espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).

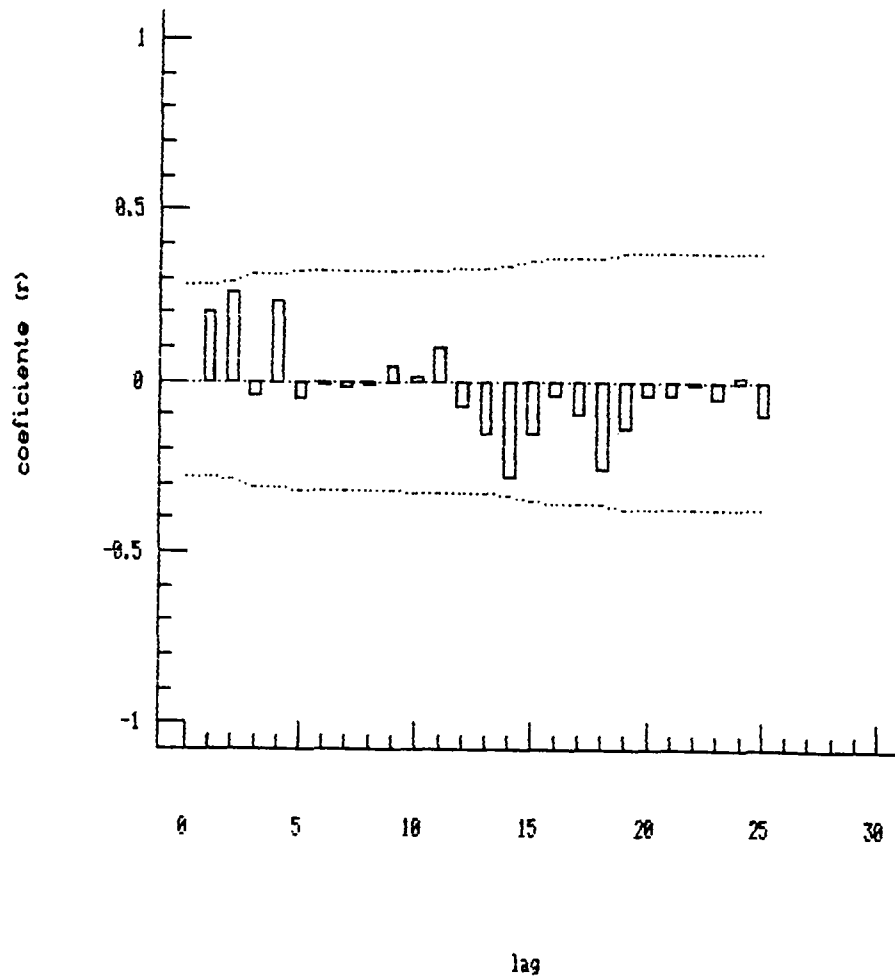


Figura 17. Correlograma da porcentagem de areia da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).

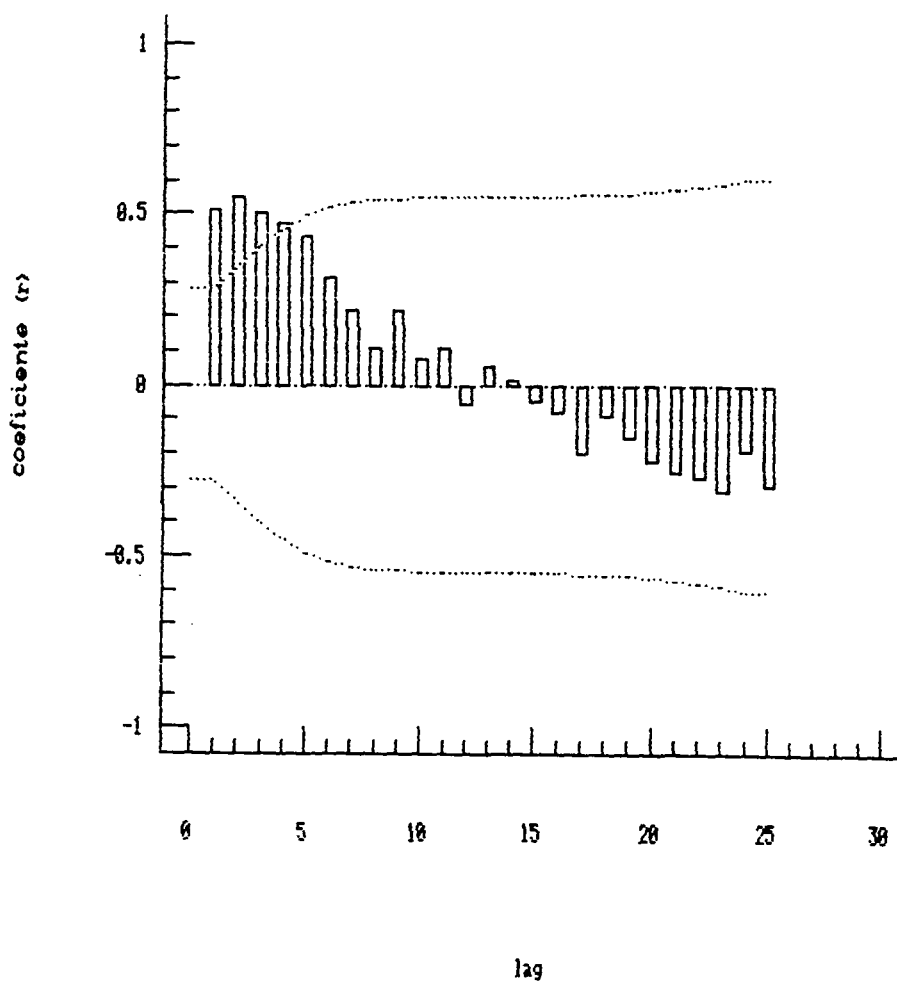


Figura 18. Correlograma da porcentagem de silte da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).

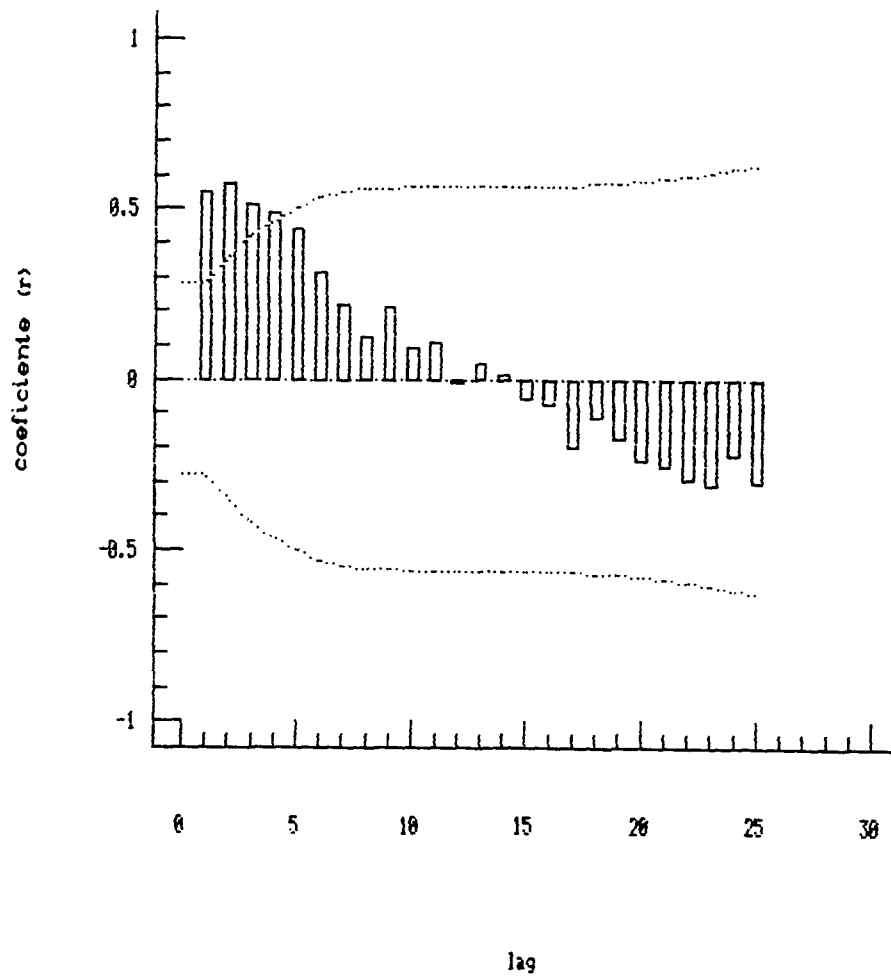


Figura 19. Correlograma da porcentagem de argila da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).

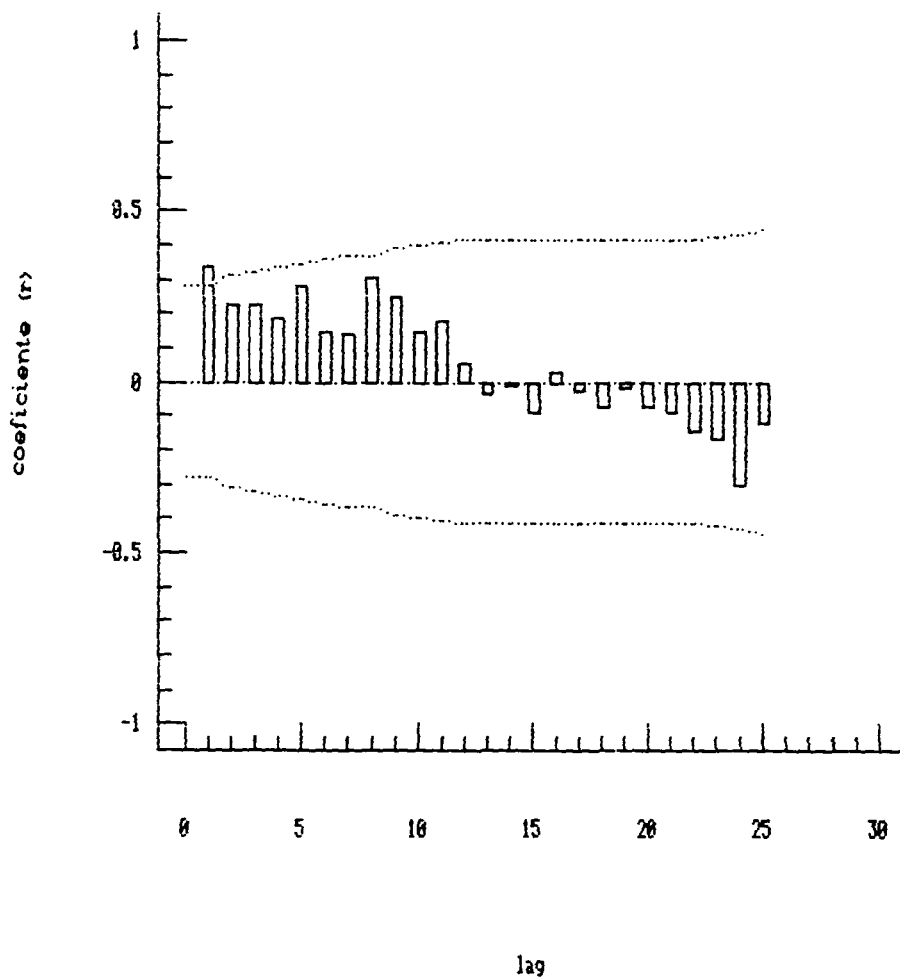


Figura 20. Correlograma do armazenamento de água (A) da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).

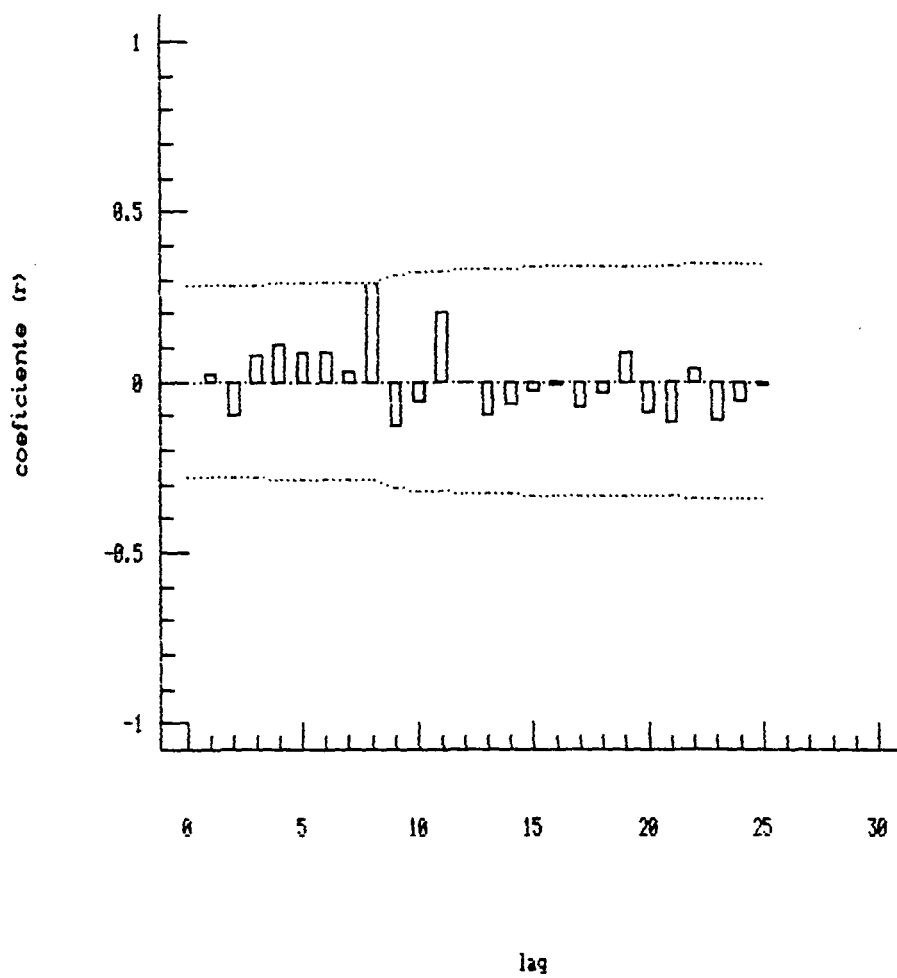


Figura 21. Correlograma da porosidade total (α) da camada de 0-30cm na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).

entre amostragens sugerem, tal como observado por Gajem et al. (1981), que o tamanho do domínio que cada amostra representa na transeção também seja dependente do intervalo entre medidas e, por isso, necessita ser melhor avaliado.

Para estimar a zona de influência (ou comprimento da autocorrelação), isto é, a distância além da qual os valores observados são independentes um dos outros, foram utilizados dois critérios: (i) por observação visual gráfica, considerando a distância a partir da qual os coeficientes de autocorrelação não são significativamente diferentes de zero, isto é, até quando os coeficientes de autocorrelação são menores do que o dobro de seus respectivos erros padrões (STATGRAPHICS, 1987); esse critério, doravante, será denotado pelo símbolo V ; e (ii) através do conceito de escala integral (E.I.), uma vez que o seu valor representa a distância dentro da qual as observações são correlacionadas (Vauclin et al. 1982; Gurovich & Stern, 1983), isto é, é a área sob a função r_1 . Num processo unidimensional, esta área corresponde a (Bakr et al. 1978):

$$E.I. = \int_0^{\infty} r_h dh \quad (16)$$

Para tanto, os valores de r em função de h para cada autocorrelograma das figuras 4 a 21, foram ajustadas pelo método dos quadrados mínimos (Borato, 1984), para a seguinte equação, proposta por Nielsen & Cassel (1984):

$$r_1 = e^{(-h/\lambda)} \quad (5)$$

onde h é o "lag" (ou distância) e λ é o tamanho de domínio que cada amostra representa na transeção.

Usando as equações (16) e (5), obtém-se:

$$E.I. = \lambda \quad (17)$$

Os valores de V e $E.I.$ em função dos espaçamentos entre amostragens de 20 e 200cm são apresentados no quadro 4, para todas as propriedades físicas do solo investigadas na transeção da área 3.

Quadro 4. Comprimentos da autocorrelação de acordo com os critérios V e $E.I.$, em função dos espaçamentos de amostragens de 20 e 200cm para as propriedades físicas do solo na transeção da área 3.

PARÂMETRO	ESPAÇAMENTO=20cm		ESPAÇAMENTO=200cm	
	V(m)	E. I. (m)	V(m)	E. I. (m)
U	0,2	0,17	0,0	0,0
$\rho_s(0-15)$ (g/cm ³)	0,0	0,0	0,0	0,0
$\rho_s(15-30)$ (g/cm ³)	0,0	0,0	2,0	1,67
ρ_p (g/cm ³)	0,9	0,77	6,0	6,79
areia (%)	0,6	0,55	0,0	0,0
silte (%)	0,2	0,21	8,0	8,04
argila (%)	0,2	0,2	8,0	8,26
A (cm)	0,0	0,0	3,0	3,78
α (cm ³ /cm ³)	0,0	0,0	0,0	0,0

Com efeito, tanto os valores de $E.I$ como de V mostram que as zonas de influência foram dependentes do intervalo entre amostragens, com exceção para $\rho_s(0-15)$ e α . É interessante

observar que enquanto U e areia perderam estrutura espacial com o aumento do intervalo de amostragens de 20 para 200cm, as outras, isto é, $\rho_s(15-30)$, ρ_p , silte, argila e A, ganharam dependência. Esse aumento na dependência espacial de $\rho_s(15-30)$, ρ_p e em A, por outro lado, pode ter sido decorrente daquele verificado com os teores de silte e argila, como respectivamente mostram os crosscorrelogramas das figuras 22, 23 e 24. Nota-se, além disso, que o silte se correlacionou negativamente no espaço com essas propriedades, enquanto que a argila, positivamente, o que é bastante coerente. Situação semelhante à ocorrida com esses parâmetros também foi observada por Gajem et al. (1981), ou seja, maiores zonas de influência associadas a maiores espaçamentos de amostragens na transeção. E isso permite concluir que o parâmetro λ na equação (5) é um fator de escala e que o tamanho do domínio que cada amostra representa na transeção é dependente do espaçamento entre medidas, o que implica na dificuldade de se selecionar intervalos espaciais em futuros esquemas de amostragens de parâmetros do solo na área 3. Adicionalmente, pode-se concluir, ainda, que erros apreciáveis podem ser cometidos ao se generalizar resultados advindos de um conjunto de valores medidos quando se assume que o comprimento da autocorrelação é único na transeção. E as razões disso, portanto, podem ser parcialmente explicadas pelas altas variâncias associadas aos maiores intervalos de amostragens.

4.2 ÁREA 2 (RECÉM MINERADA)

O quadro 5 apresenta alguns resultados estatísticos para

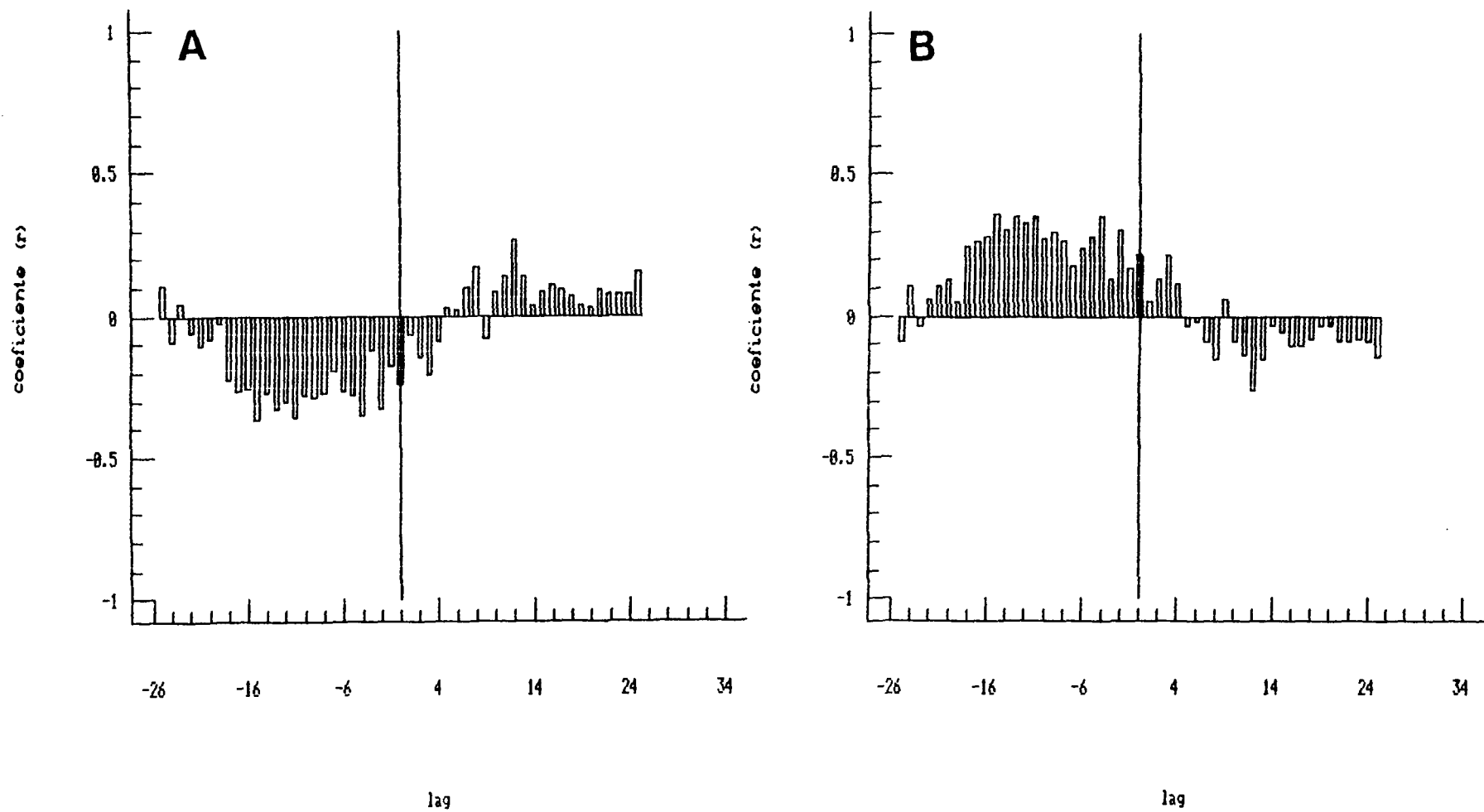


Figura 22. Crosscorrelograma entre $\rho_s(15-30)$ e porcentagem de silte(A) e entre $\rho_s(15-30)$ e porcentagem de argila na (B) transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).

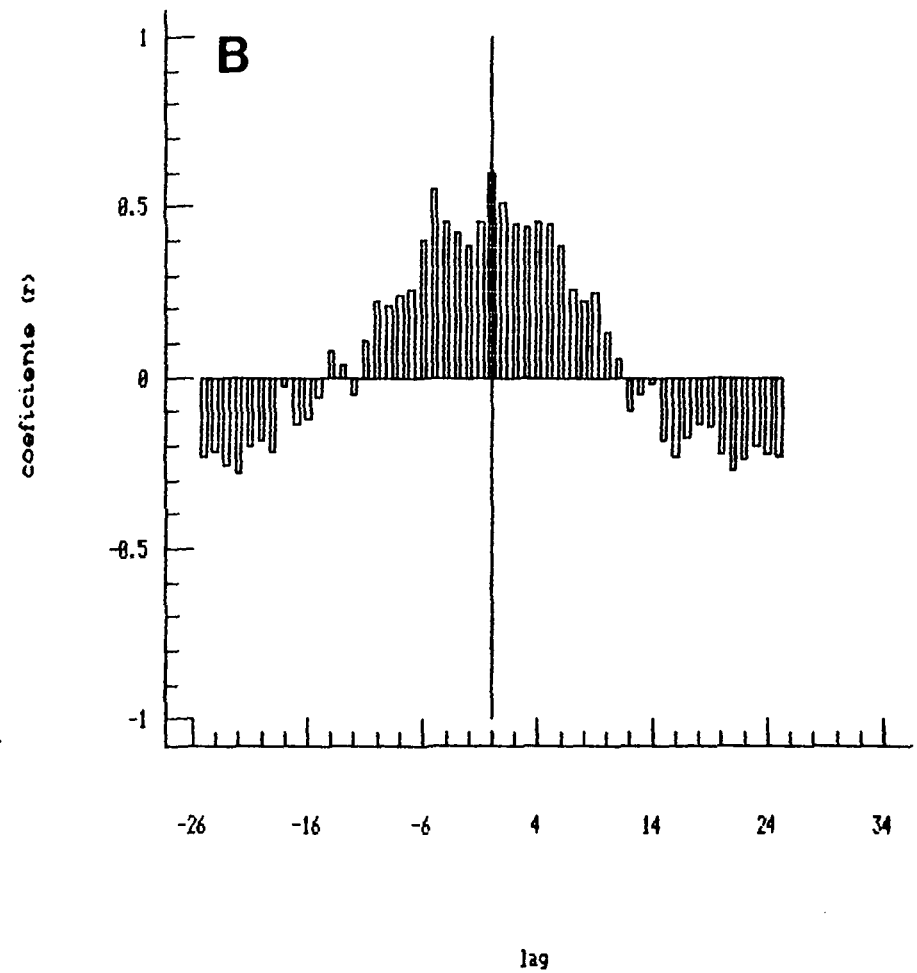
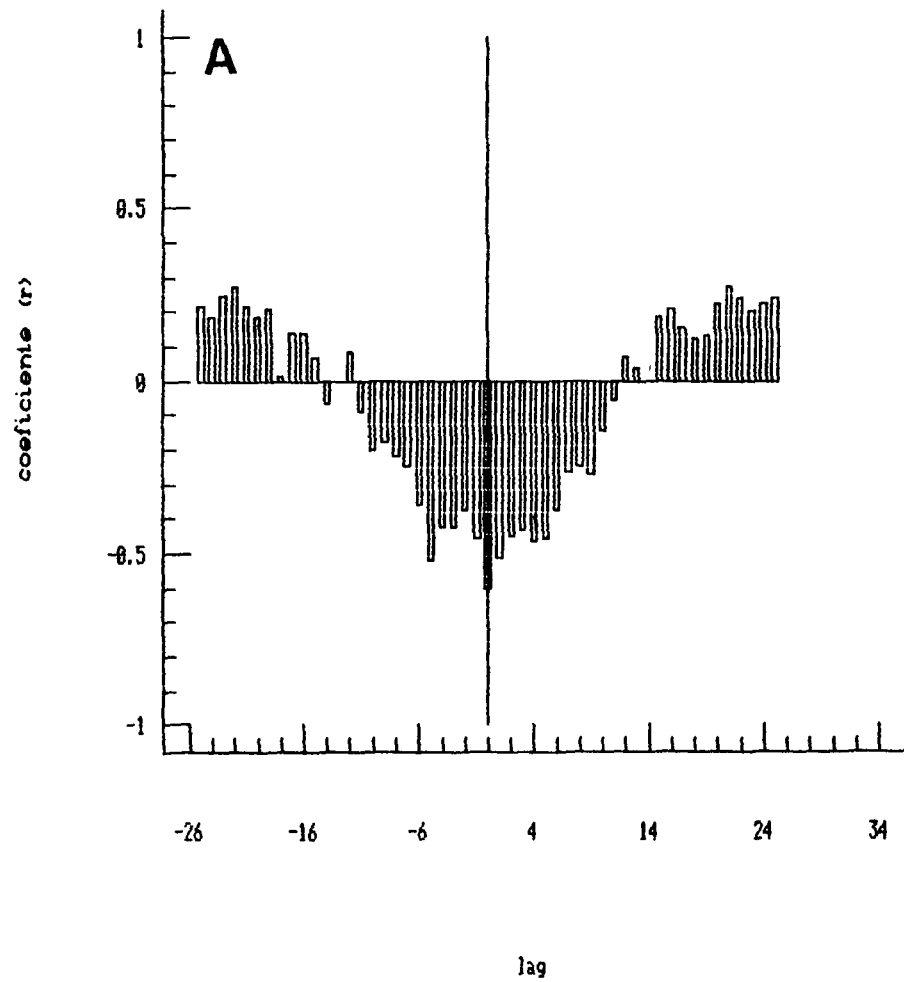


Figura 23. Crosscorrelograma entre ρ_p e a porcentagem de silte (A) e entre ρ_p e a porcentagem de argila (B) na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).

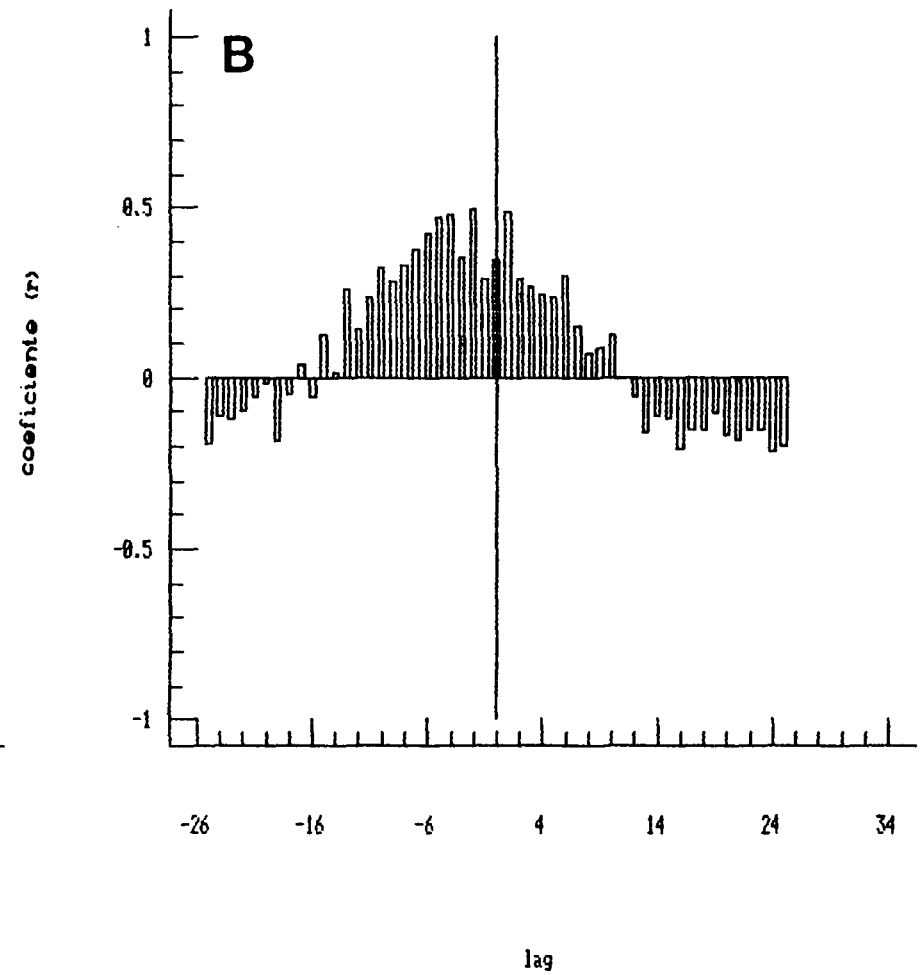
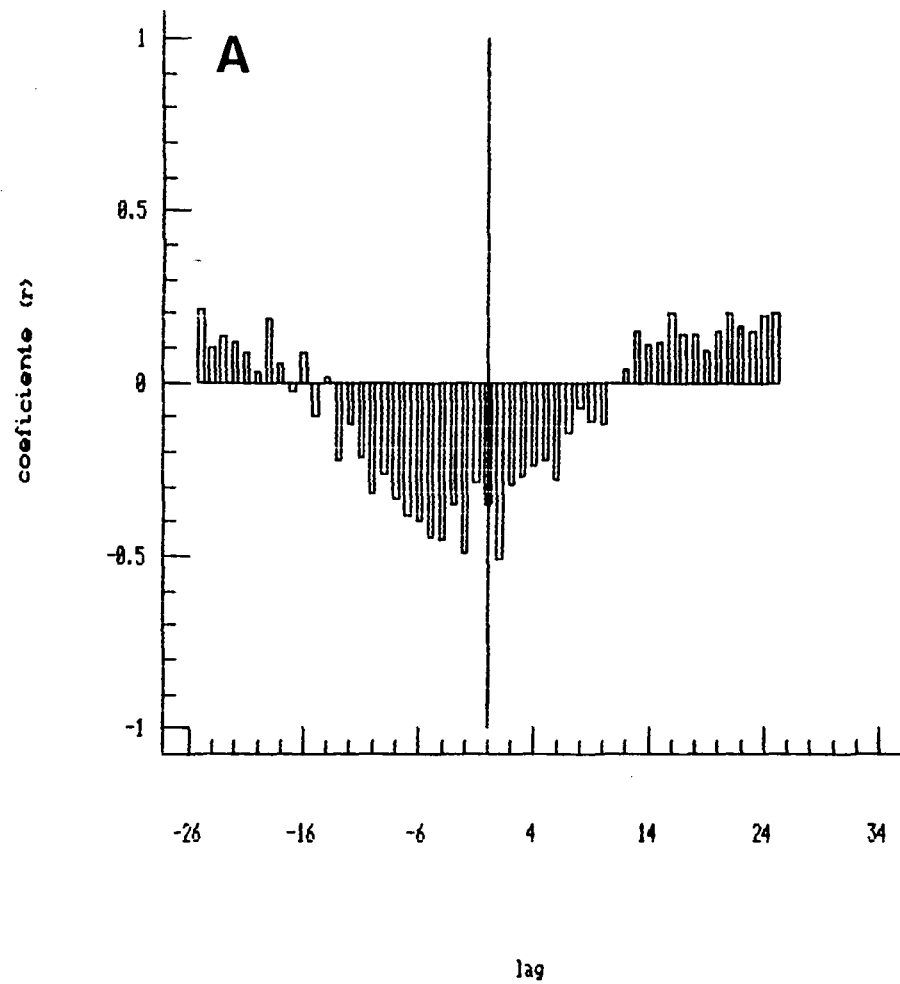


Figura 24. Crosscorrelograma entre o armazenamento de água e a porcentagem de silte (A) e entre o armazenamento de água e a porcentagem de argila (B) na transeção da área 3, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).

U, $\rho_s(0-15)$, $\rho_s(15-30)$, ρ_p , areia, silte, argila, A e α dos primeiros 30cm de profundidade do solo na transeção da área 2 (recém minerada), para os dois espaçamentos entre amostragens. Observa-se que, diferentemente da área não minerada (área 3), o coeficiente de variação da areia aumentou com o aumento do espaçamento entre amostragens e manteve-se aproximadamente igual para U, ρ_s (nas duas camadas) e ρ_p . Valores aproximadamente iguais no desvio padrão também são notados para os dois espaçamentos, o que não ocorreu na área 3.

Quadro 5. Alguns resultados estatísticos de U, ρ_s , ρ_p , areia, silte, argila, (A) e (α) dos primeiros 30cm de profundidade do solo transeção de 100m de comprimento da área 2, para os dois espaçamentos entre amostragens.

	U	ρ_s		ρ_p	areia	silte	argila	A	α
		(0-15)	(15-30)						
		g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	%	%	%	cm	cm ³ /cm ³
ESPAÇAMENTO ENTRE AMOSTRAGENS=20cm									
MÉDIA	47,58	0,910	0,846	2,721	2,83	18,44	78,73	12,56	0,677
MIN.	44,20	0,819	0,723	2,508	1,62	14,17	74,23	11,12	0,639
MAX.	55,24	1,020	0,933	2,911	4,30	23,34	84,00	13,76	0,713
A.V.	11,04	0,201	0,210	0,403	2,68	9,17	9,77	2,64	0,074
D.P.	1,964	4,5E-2	4,7E-2	8,5E-2	5,3E-1	2,09	2,10	0,58	1,6E-2
C.V.	4,129	4,909	5,559	3,113	18,55	11,33	2,78	4,63	2,372
ESPAÇAMENTO ENTRE AMOSTRAGENS = 200cm									
MÉDIA	47,11	0,879	0,833	2,714	3,06	19,16	77,78	12,19	0,684
MIN.	33,66	0,617	0,669	2,430	1,62	8,42	69,48	9,53	0,612
MAX.	55,24	1,020	0,966	2,919	3,87	27,19	87,70	14,18	0,768
A.V.	21,58	0,403	0,297	0,482	2,25	18,77	18,22	4,65	0,156
D.P.	3,262	9,3E-2	6,3E-2	1,0E-1	4,5E-1	3,82	3,90	1,03	2,5E-2
C.V.	6,924	10,56	7,599	3,831	14,62	19,93	5,01	8,46	3,614

A.V.= amplitude de variação; D.P.= desvio padrão; C.V.= coeficiente de variação

Os quadros 2 e 5 permitem observar que houve um aumento na massa específica de ambas as camadas, bem como nos teores de areia da área recém minerada (área 2) com relação à área não minerada (área 3). Esses aumentos, contudo, parecem pouco expressivos. Admitindo-se que antes da mineração a área recém minerada guardava alguma relação de semelhança com a área não minerada, pode-se concluir que as técnicas adotadas na recomposição do solo após a lavra, não promoveram importantes alterações nas suas propriedades físicas, em termos médios, nos primeiros 30cm de profundidade. Nesse aspecto, vale ainda ressaltar que a porosidade total média da área não minerada foi 68%, enquanto na área recém minerada foi 63% (redução de 7%, aproximadamente).

Os valores de precisão relativa apresentados no quadro 6, mostram que as variâncias desses parâmetros também podem ser atribuídas, quase que na sua totalidade, à própria variabilidade espacial ocorrida na transeção da área 2.

Quadro 6. Precisão relativa para os parâmetros ρ_p , areia, silte e argila na transeção da área 2, para os dois espaçamentos entre amostragens. Valores em porcentagem.

PARÂMETRO		ESPAÇAMENTO=20cm	ESPAÇAMENTO=200cm
ρ_p	(g/cm ³)	98,63	98,62
areia	(%)	99,92	99,95
silte	(%)	100,00	100,00
argila	(%)	99,99	99,99

As figuras 25 a 33 mostram, respectivamente, os autocorrelogramas para U, $\rho_s(0-15)$, $\rho_s(15-30)$, ρ_p , areia, silte,

argila, A e α para os espaçamentos de amostragens de 20cm na transeção, e as figuras 34 a 42 os autocorrelogramas das mesmas propriedades quando o espaçamento entre amostragens foi de 200cm. Tal como na área 3, os valores de $\rho_s(0-15)$ e α mostraram-se espacialmente independentes entre si, em ambos espaçamentos entre medidas (figuras 26, 33, 35 e 42). As figuras 28 e 37 também mostram que a recomposição do solo após a lavra promoveu uma distribuição ao acaso nos valores de ρ_p até os primeiros 30cm de profundidade. As demais figuras, isto é, 25 e 34 para U , 27 e 36 para $\rho_s(15-30)$, 29 e 38 para areia, 30 e 39 para silte, 31 e 40 para argila, e 32 e 41 para A , evidenciam mudanças na estrutura espacial dessas propriedades com respeito aos espaçamento de amostragens. Embora situação semelhante tenha ocorrido na área 3, o confronto dos respectivos autocorrelogramas entre as duas áreas não sugere nenhum comportamento comum, como é a seguir discutido.

O quadro 7 reúne os valores dos comprimentos da autocorrelação para os espaçamentos 20 e 200cm, de acordo com os dois critérios adotados no ítem anterior, para todas as propriedades físicas do solo na transeção da área 2.

Como se observa, os valores de V e $E.I.$, indistintamente, mostram que as zonas de influência também aqui foram dependentes dos intervalos de amostragens, com exceção para $\rho_s(0-15)$, ρ_p e α , que se mantiveram espacialmente independentes na área 2. Por outro lado, quando se comparam esses valores com aqueles do quadro 4, verifica-se que os comprimentos da autocorrelação, além de variarem com a escala de amostragem na

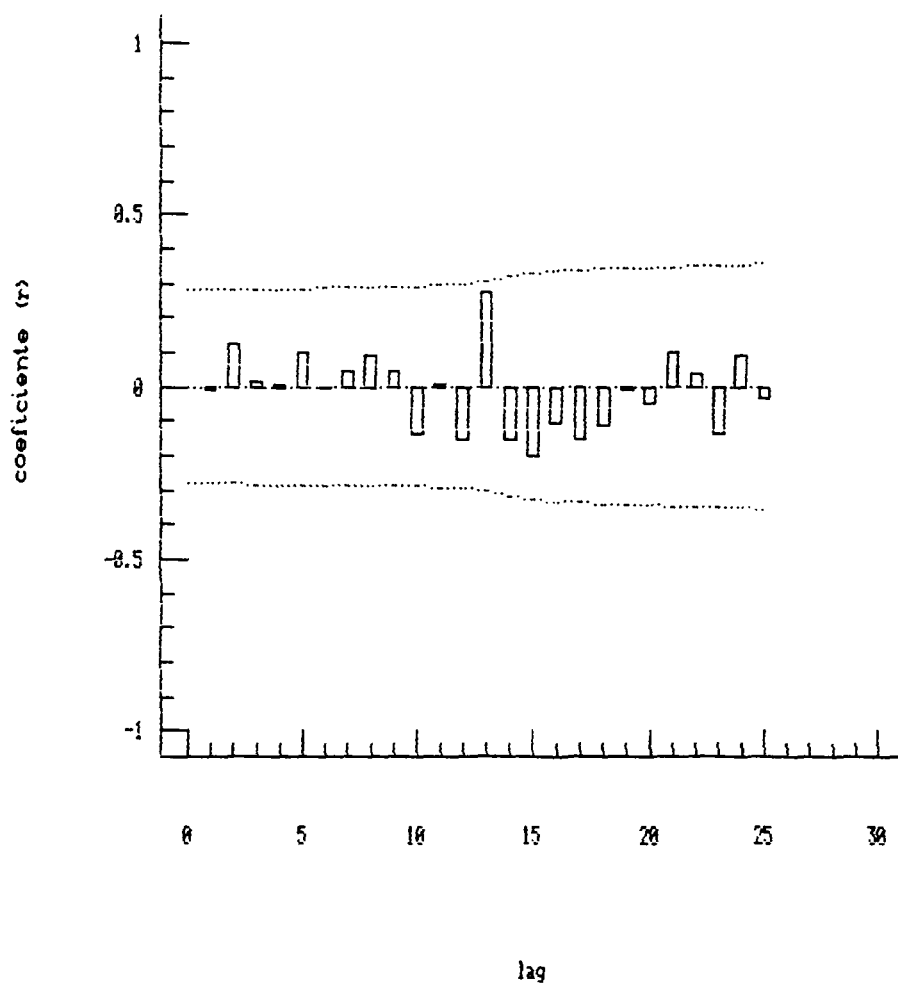


Figura 25. Correlograma da umidade gravimétrica(U) da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

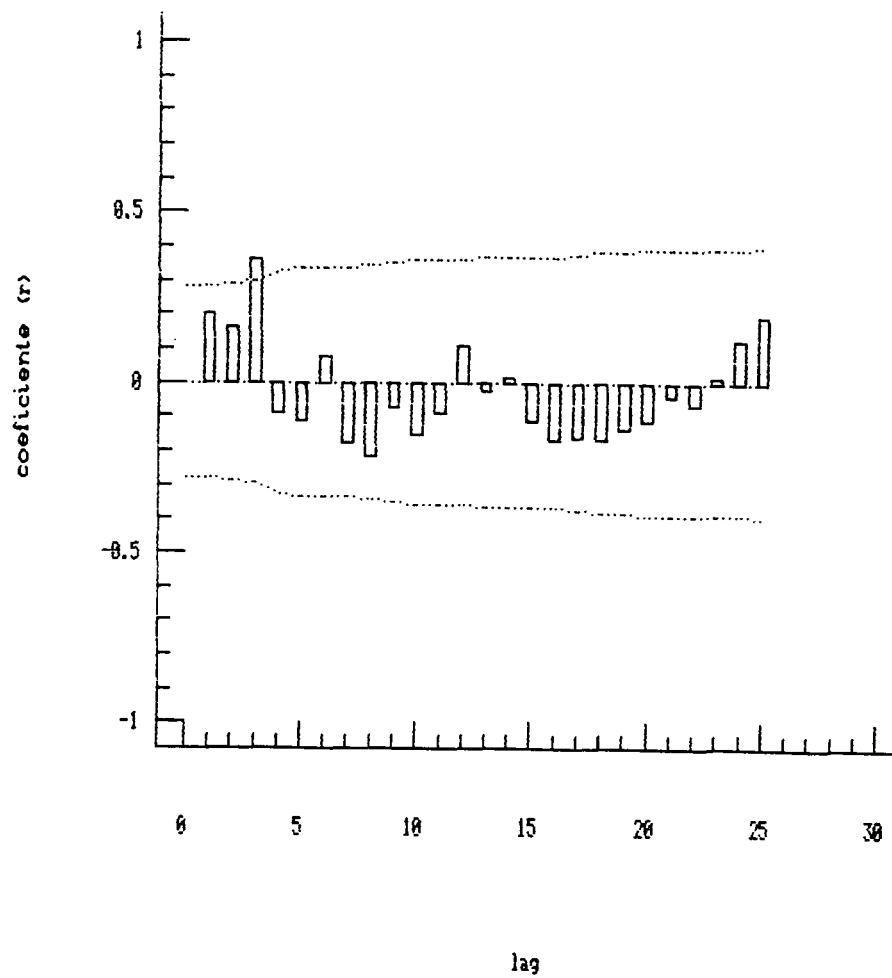


Figura 26. Correlograma da massa específica do solo da camada de 0-15cm [$\rho_s(0-15)$] na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

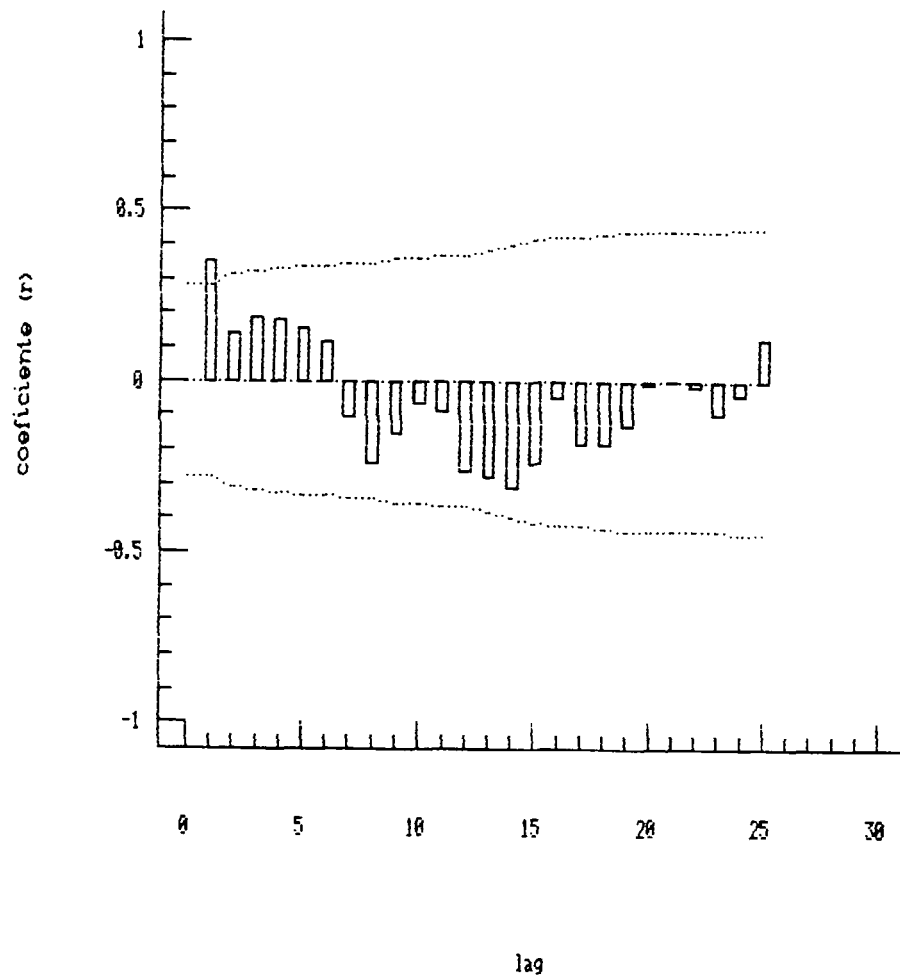


Figura 27. Correlograma da massa específica do solo da camada de 15-30cm [$\rho_s(15-30)$] na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

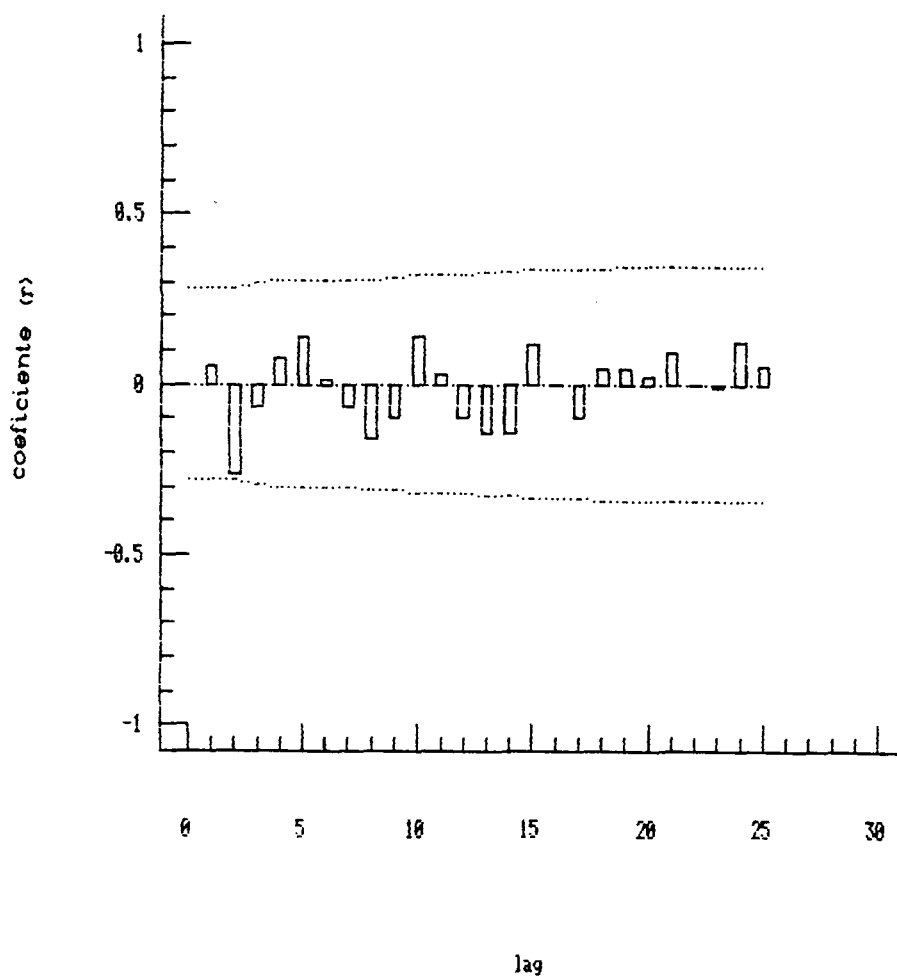


Figura 28. Correlograma da massa específica das partículas da camada de 0-30cm(ρ_p) na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

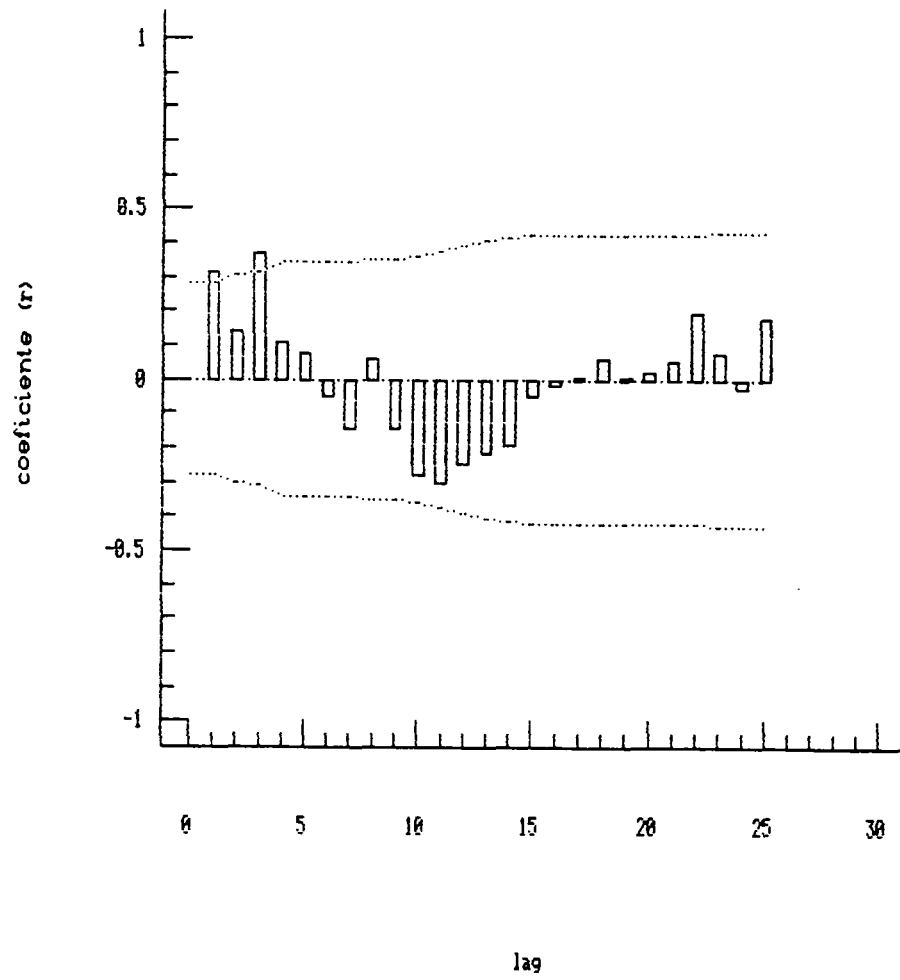


Figura 29. Correlograma da porcentagem de areia da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

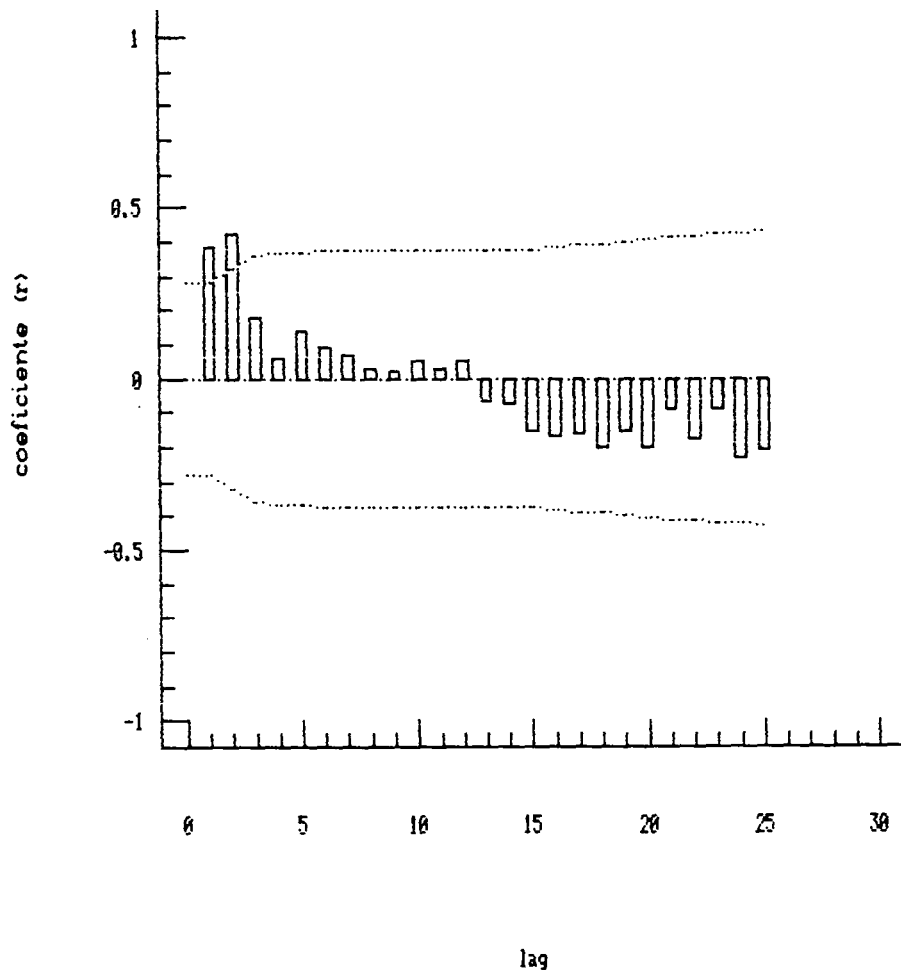


Figura 30. Correlograma da porcentagem de silte da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

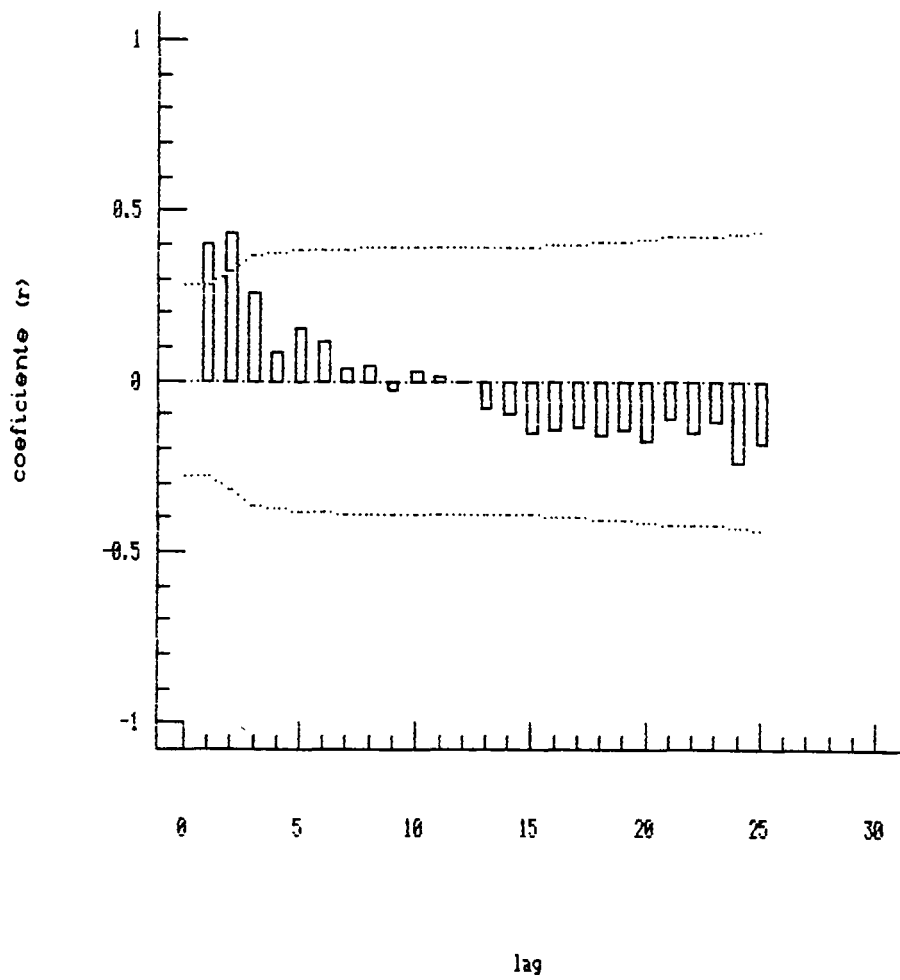


Figura 31. Correlograma da porcentagem de argila da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

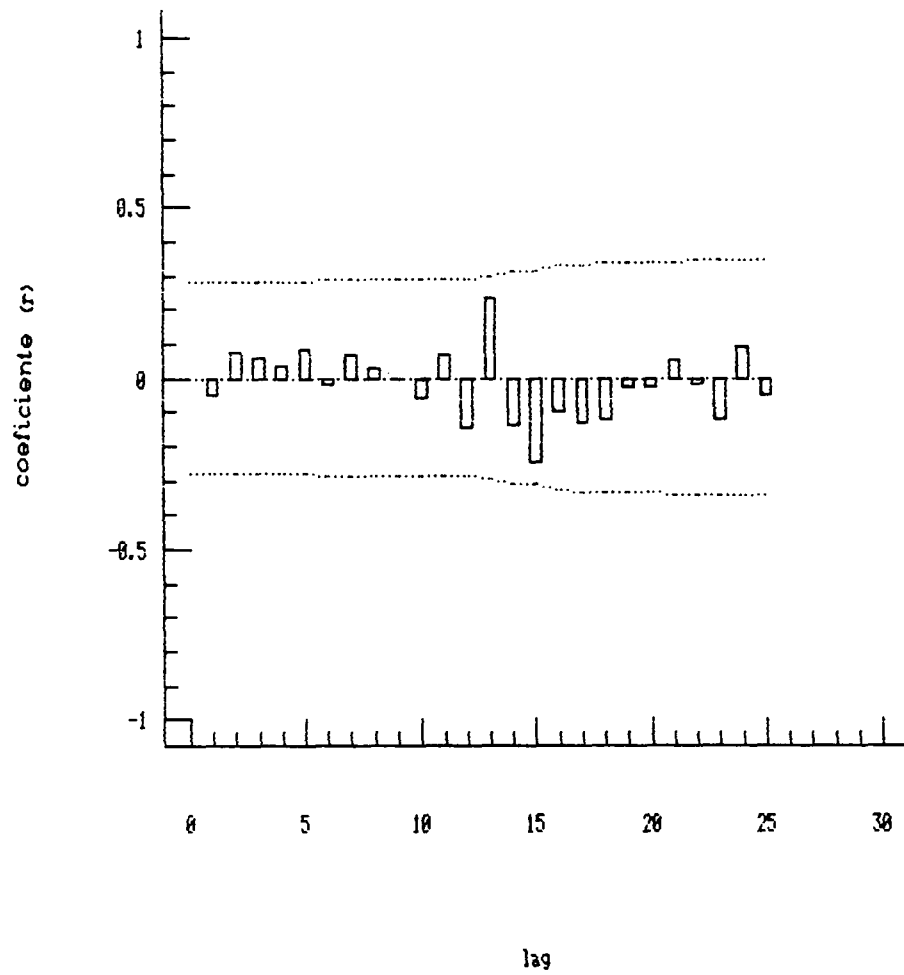


Figura 32. Correlograma do armazenamento de água (A) da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

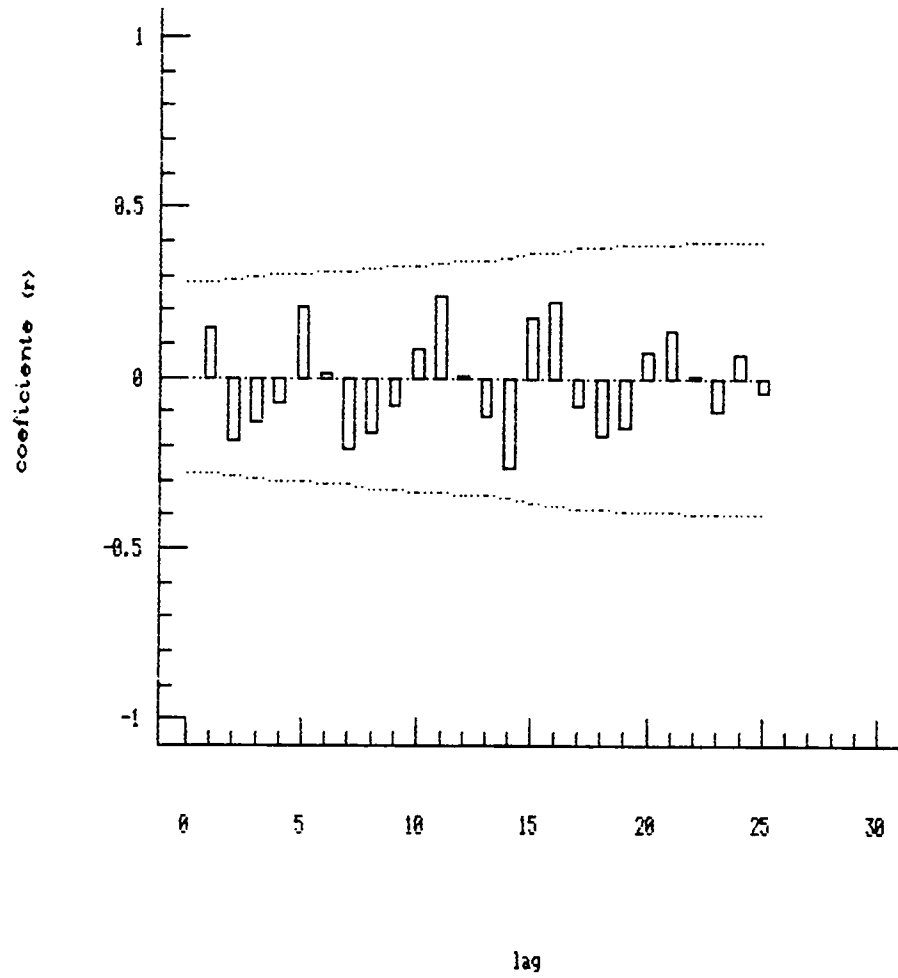


Figura 33. Correlograma da porosidade total (α) da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

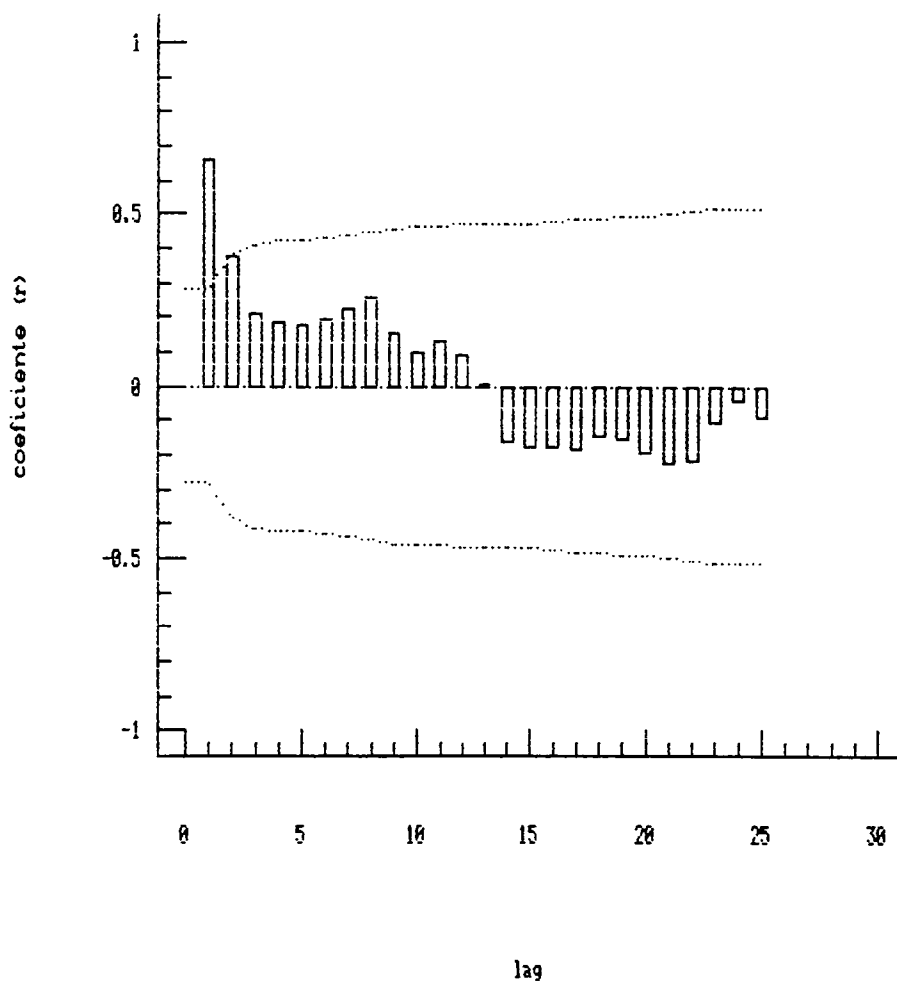


Figura 34. Correlograma da umidade gravimétrica (U) da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).

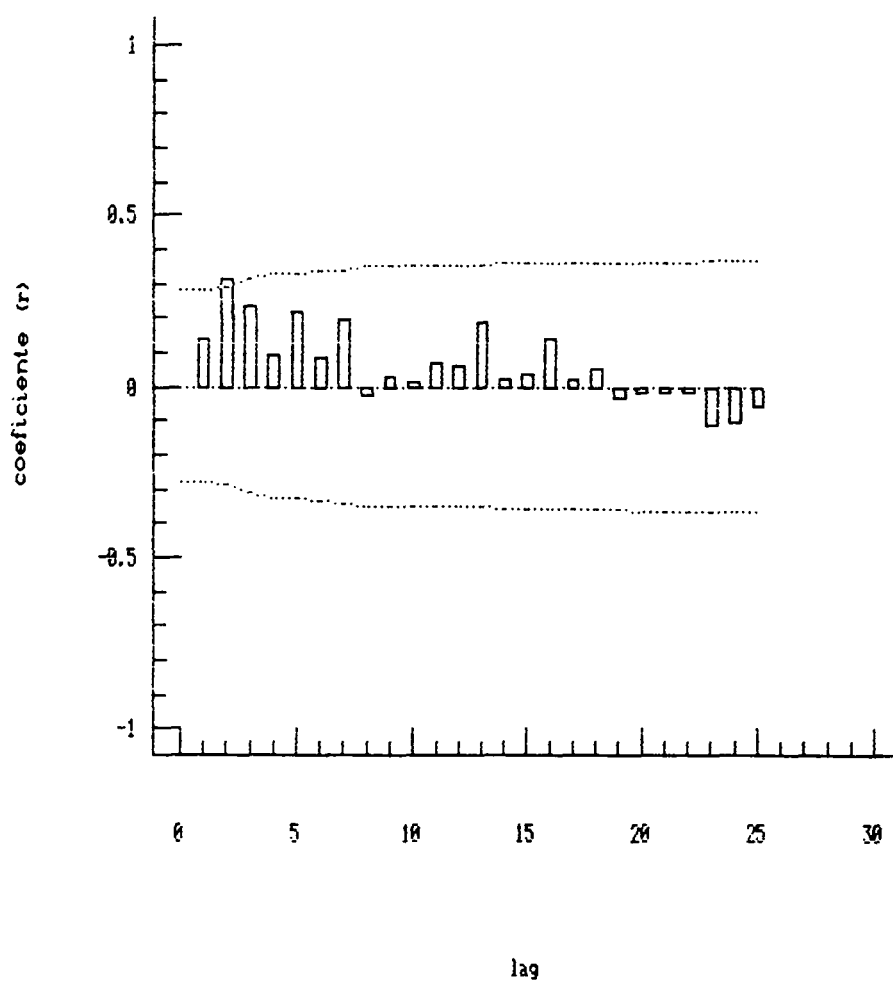


Figura 35. Correlograma da massa específica do solo da camada de 0-15cm [$\rho(0-15)$] na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostras de 200cm (1"lag"=200cm).

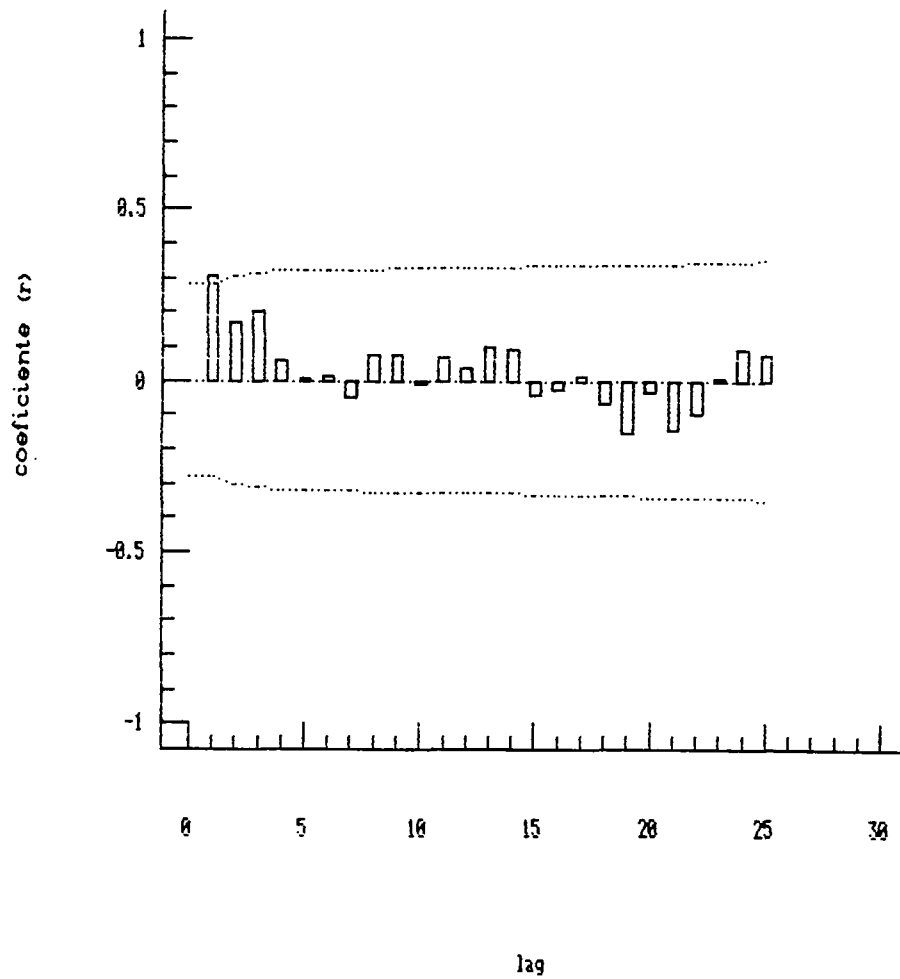


Figura 36. Correlograma da massa específica do solo da camada de 15-30cm [$\rho(15-30)$] na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostras de 200cm (1"lag"=200cm).

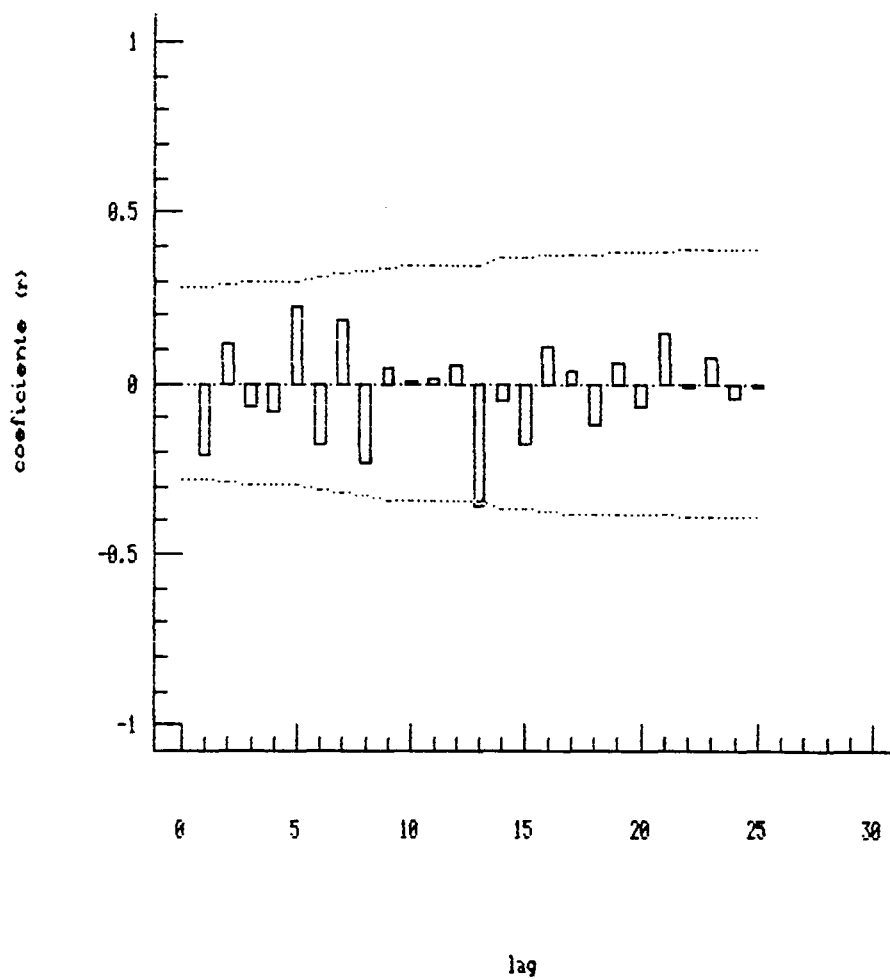


Figura 37. Correlograma da massa específica das partículas da camada de 0-30cm(ρ_p) na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostras de 200cm (1"lag"=200cm).

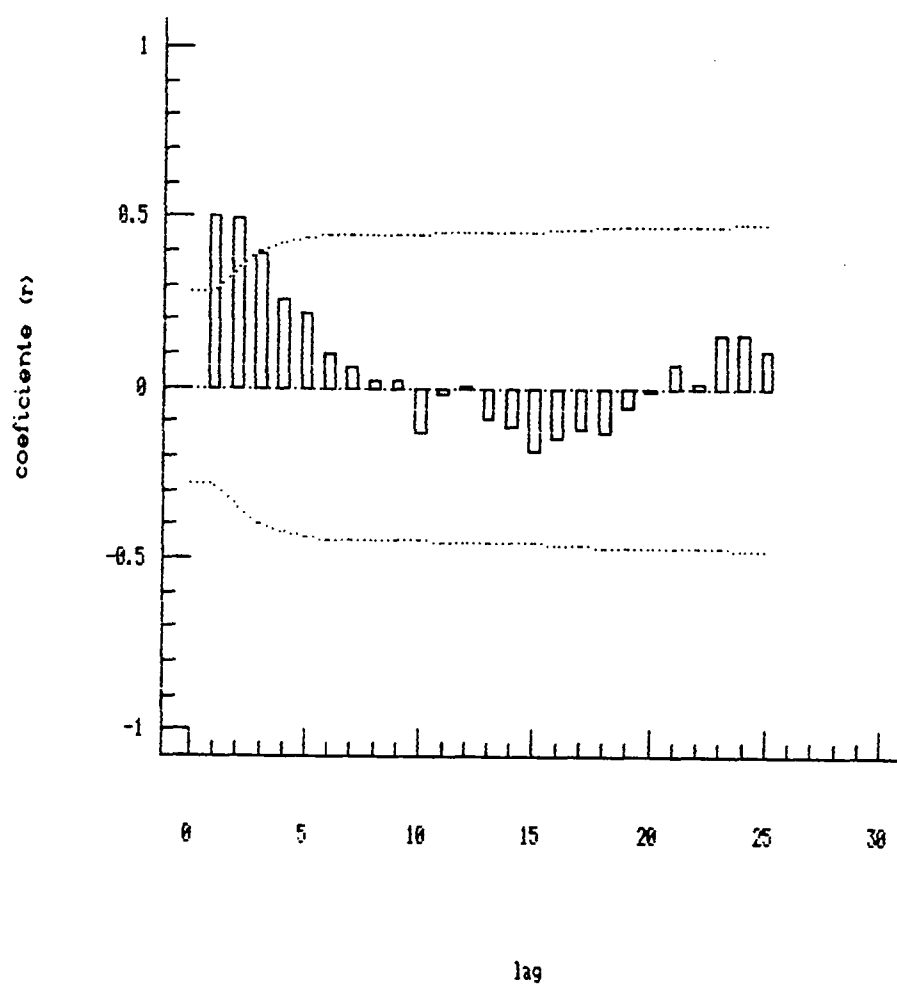


Figura 38. Correlograma da porcentagem de areia da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1 "lag"=200cm).

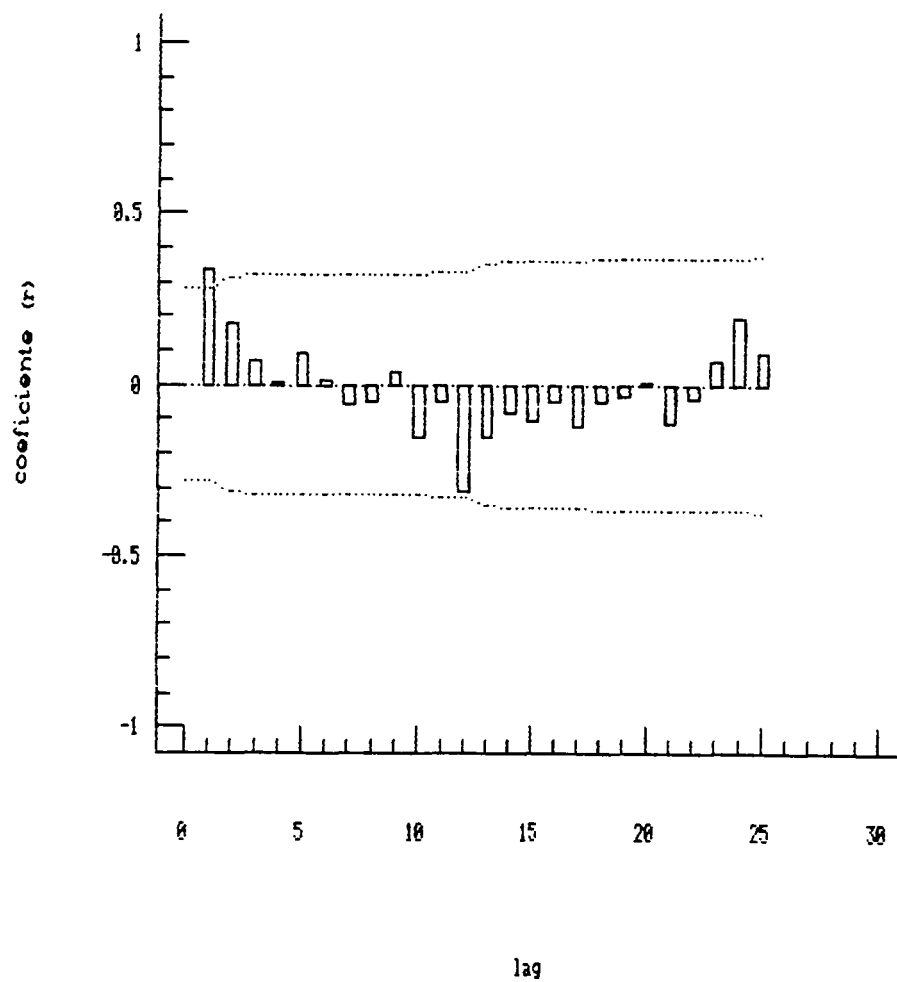


Figura 39. Correlograma da porcentagem de silte da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).

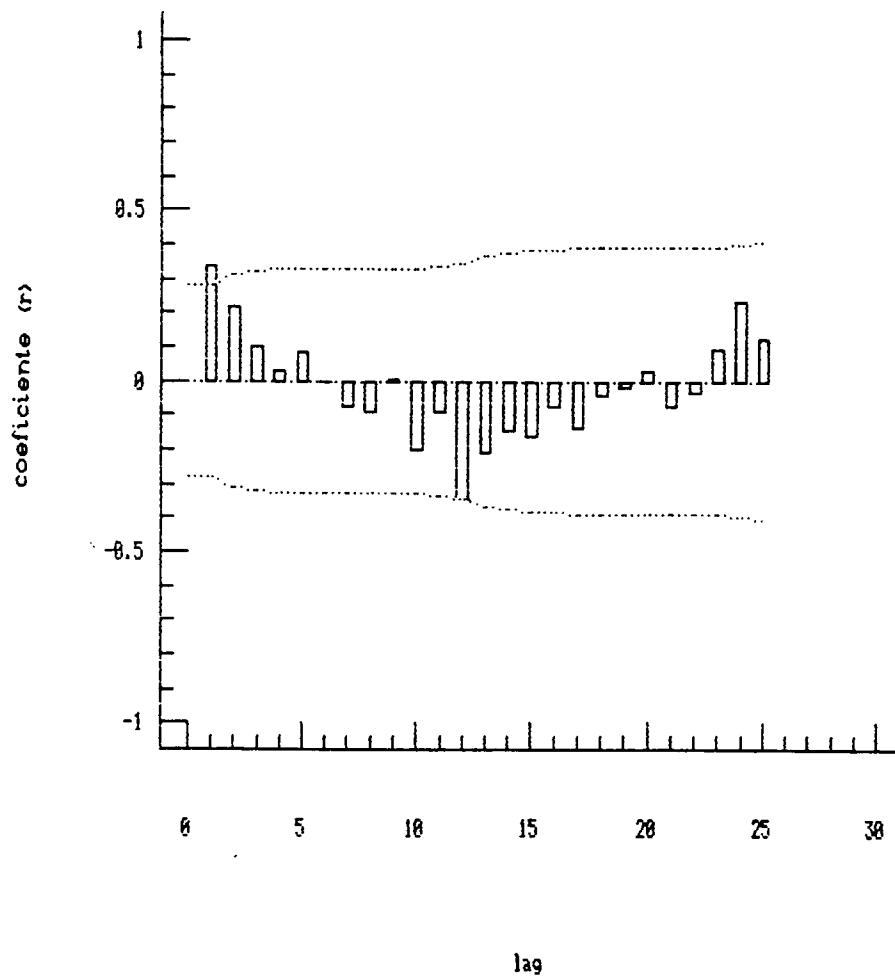


Figura 40. Correlograma da porcentagem de argila da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).

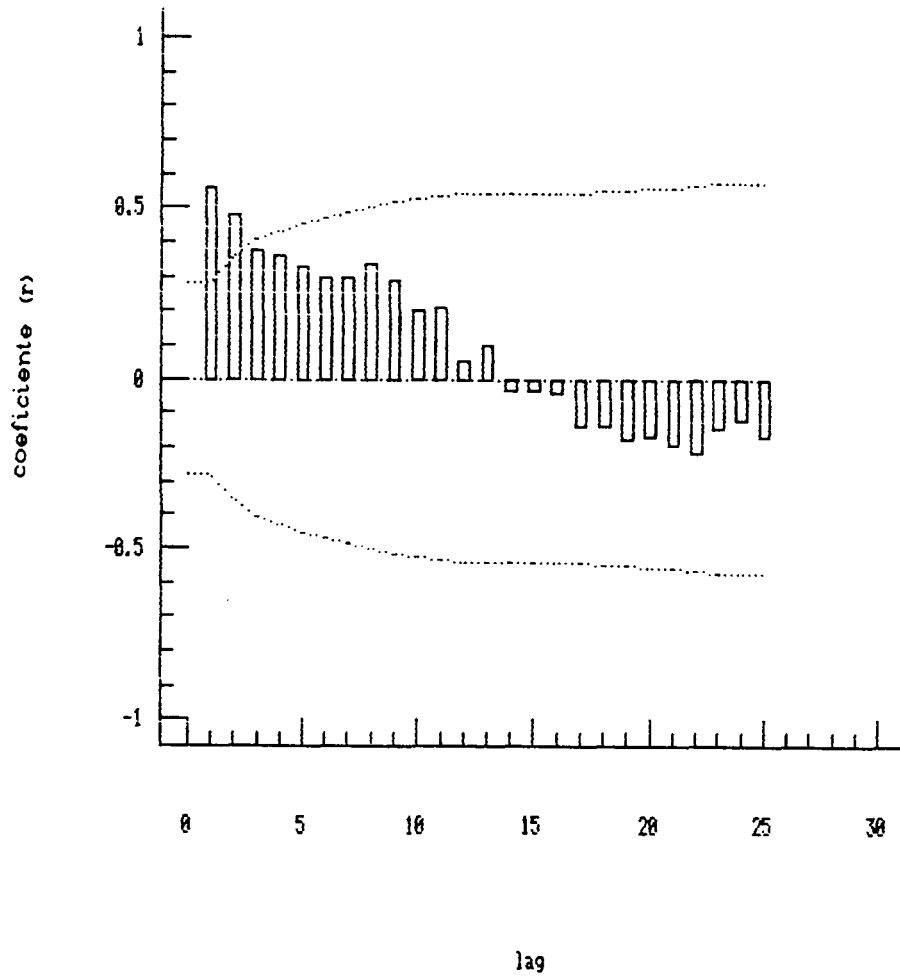


Figura 41. Correlograma do armazenamento de água (A) da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).

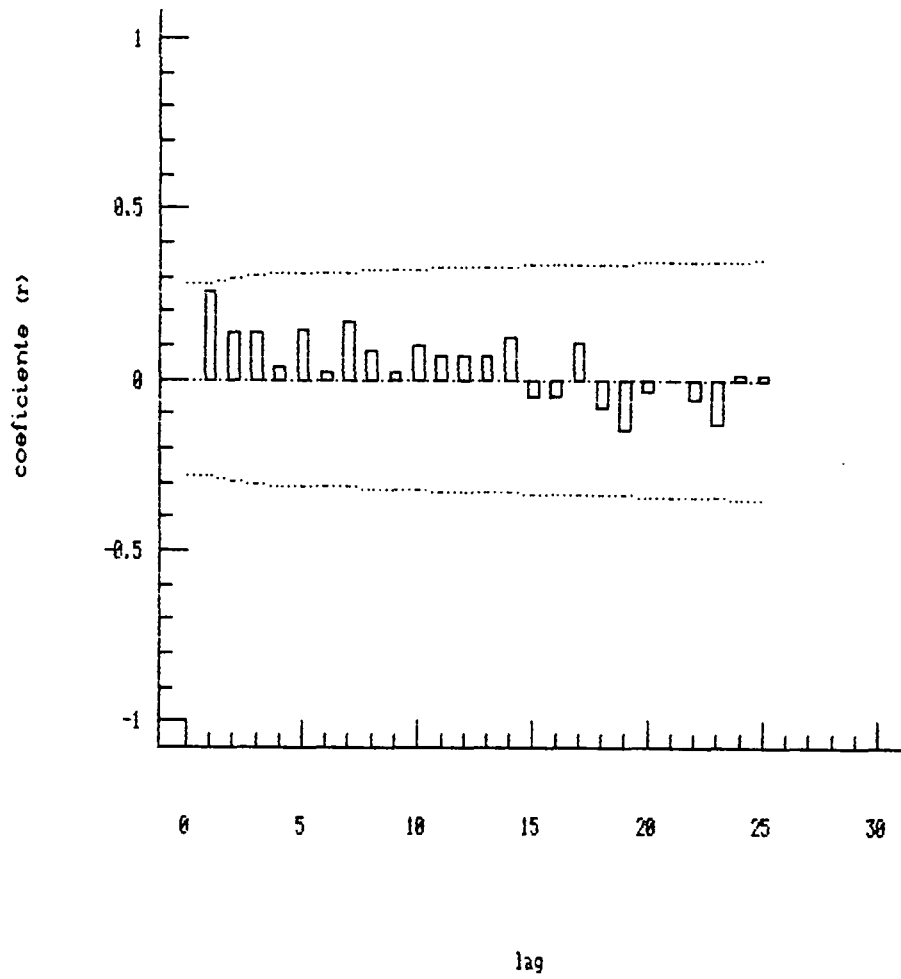


Figura 42. Correlograma da porosidade total (α) da camada de 0-30cm na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).

Quadro 7. comprimentos da autocorrelação de acordo com os critérios V e E.I., em função dos espaçamentos de amostragens 20 e 200cm para as propriedades físicas do solo na transeção da área 2.

PARÂMETRO	ESPAÇAMENTO=20cm		ESPAÇAMENTO=200cm	
	V(m)	E. I. (m)	V(m)	E. I. (m)
U	0,0	0,0	4,0	5,43
ρ_s (0-15) (g/cm ³)	0,0	0,0	0,0	0,0
ρ_s (15-30) (g/cm ³)	0,3	0,24	2,0	2,16
ρ_p (g/cm ³)	0,0	0,0	0,0	0,0
areia (%)	0,2	0,25	6,0	5,15
silte (%)	0,4	0,35	2,0	2,04
argila (%)	0,4	0,38	2,0	2,2
A (cm)	0,0	0,0	5,0	8,4
α (cm ³ /cm ³)	0,0	0,0	0,0	0,0

na transeção, eles variaram também entre as transeções. Enquanto se observa um decréscimo na estrutura espacial da areia na transeção da área 2, quando o espaçamento entre amostragens foi de 20cm, ocorreu o inverso no espaçamento de 200cm. Já para o silte, argila e ρ_p , que apresentaram altos alcances espaciais na área 3, quando o espaçamento entre medidas foi de 200cm, este alcance diminuiu na área 2. Em outras palavras, as técnicas adotadas na recomposição do solo na área 2, promoveram um aumento na magnitude da variação espacial do silte, argila e ρ_p , quando a escala de observação foi de 200cm e uma redução dessa variabilidade para U, ρ_s (15-30), areia e A. Esse decréscimo na magnitude da variação espacial de U e A, por outro lado, pode ter sido promovido indiretamente em decorrência do ocorrido com a areia, como respectivamente mostram os crosscorrelogramas das figuras 43 e 44.

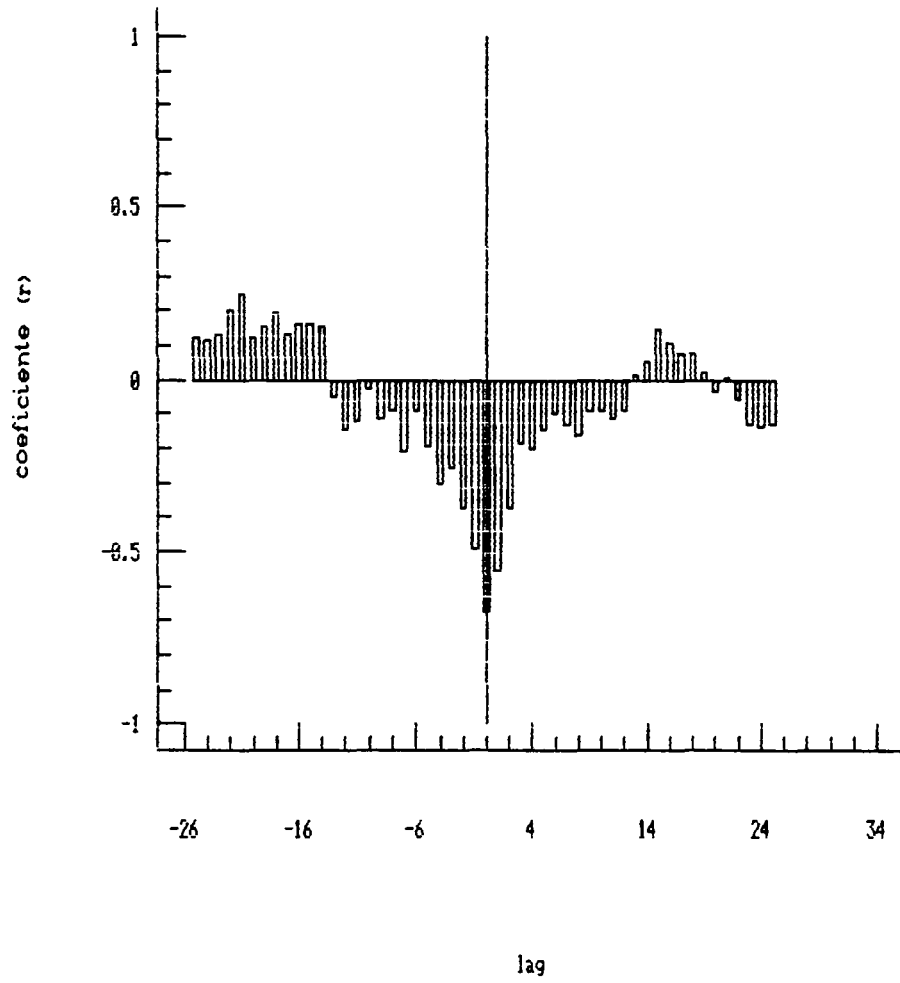


Figura 43. Crosscorrelograma entre umidade gravimétrica e a porcentagem de areia na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostragens de 200cm (1"lag"=200cm).

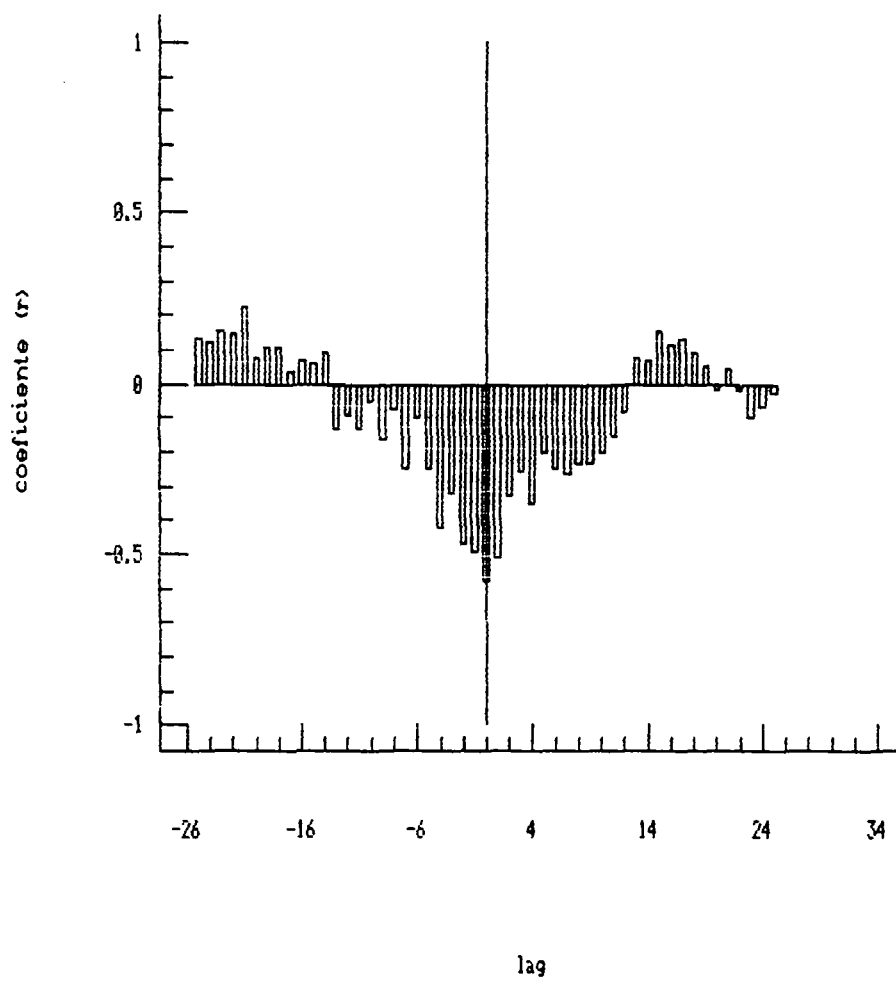


Figura 44. Crosscorrelograma entre armazenamento de água e a porcentagem de areia na transeção da área 2, para o espaçamento entre amostras de 200cm (1"lag"=200cm).

Estes fatos reforçam a conclusão do ítem anterior, onde se disse que o parâmetro λ na equação (5) é um fator de escala e que o tamanho do domínio que cada amostra representa na transeção é dependente do espaçamento entre medidas, o que implica, também na área 2, em dificuldades de se selecionar intervalos espaciais em futuros esquemas de amostragens de parâmetros do solo. Por outro lado, a justificativa anterior parece ser menos importante neste caso, porque as variâncias dos parâmetros nos dois espaçamentos de amostragens se mostraram próximas (quadro 5). É provável, portanto, que a carência de estacionaridade do sistema seja a justificativa mais importante. E isso se justifica, embora os semivariogramas não tenham sido obtidos, pelas apreciáveis irregularidades nos coeficientes de autocorrelação dos altos "lags" ou pelo contínuo decréscimo desses coeficientes, observáveis na grande maioria dos correlogramas apresentados, notadamente para areia, silte e argila nos espaçamentos entre amostragens de 200cm.

4.3 ÁREA 1 (MINERADA EM FASE DE REABILITAÇÃO)

O quadro 8 apresenta os resultados estatísticos para U, $\rho_s(0-15)$, $\rho_s(15-30)$, ρ_p , areia, silte e argila, A, α e pH dos primeiros 30cm de profundidade do solo, além da altura de plantas, da área 1, para o espaçamento de amostragem de 20cm na transeção.

Com base nos quadros 5 e 8, observa-se que as variâncias e os coeficientes de variação das propriedades físicas na área 1

foram próximos daqueles da área 2, com exceção da areia e α , que respectivamente aumentou e diminuiu. Houve, por outro lado, um aumento nos valores de ρ_s e um conseqüente decréscimo em α . Esse decréscimo em α foi de aproximadamente 6,8% com relação à área 2 e de 13,6% com relação à área 3.

Quadro 8. Alguns resultados estatísticos de U, ρ_s , ρ_p , areia, silte, argila, A, α e pH dos primeiros 30cm de profundidade do solo e altura de plantas na transeção de 10m de comprimento da área 1 para o espaçamento adotado.

		MEDIA	MIN.	MAX.	A.V.	D.P.	C.V.
U	(%)	32,16	27,91	37,73	9,82	2,88	8,96
ρ_s (0-15)	(g/cm ³)	1,132	0,910	1,268	0,358	6,6E-2	5,855
ρ_s (15-30)	(g/cm ³)	1,115	0,908	1,279	0,371	7,8E-2	7,005
ρ_p	(g/cm ³)	2,724	2,288	2,850	0,562	8,4E-2	3,099
areia	(%)	3,78	2,90	4,63	1,73	4,7E-1	12,37
silte	(%)	13,44	6,45	20,38	13,93	3,13	23,31
argila	(%)	82,76	75,69	90,12	14,43	3,13	4,061
A	(cm)	10,83	8,94	12,65	3,75	0,99	9,15
α	(cm ³ /cm ³)	0,585	0,430	0,644	0,214	2,8E-2	4,832
pH		5,5	4,4	6,9	2,5	0,7	12,75
Alt. planta	(cm)	182,8	134,0	237,0	103,0	27,41	14,99

A.V.= amplitude de variação;D.P.= desvio padrão;C.V.= coeficiente de variação.

No quadro 9 são apresentados os valores de precisão relativa para os parâmetros ρ_p , areia, silte, argila e também para o pH do solo, evidenciando que as variâncias desses parâmetros na transeção da área 1 não se devem, praticamente, a erros de medidas em laboratório.

As figuras 45 a 53 mostram, respectivamente, os

autocorrelogramas para U , $\rho_s(0-15)$, $\rho_s(15-30)$, ρ_p , areia, silte, argila, A e α para o espaçamento de amostragem de 20cm na transeção. Nota-se, tal como ocorreu nas áreas 2 e 3, que os valores de $\rho_s(0-15)$ e α mostraram-se espacialmente independentes

Quadro 9. Precisão relativa, em porcentagem, para os parâmetros ρ_s , areia, silte, argila e pH do solo na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm.

PARÂMETROS	PRECISÃO RELATIVA
ρ	98,45
areia	99,8
silte	100,0
argila	99,99
pH	98,03

entre si (figuras 46 e 53). Houve, também, uma perda na estrutura espacial nos valores de $\rho_s(15-30)$ (figura 47), enquanto que os valores de ρ_p mantiveram-se independentes tanto na área 1 como na 2. Os valores de E.I. e V do quadro 10, por outro lado, mostram que os comprimentos da autocorrelação diminuíram para silte e argila e aumentaram para a areia com relação à área 2 (quadro 7), se aproximando daqueles verificados na área 3 (quadro 4). Isto evidencia que a estrutura espacial que cada propriedade adquiriu após a mineração, dependeu do processo de recomposição do solo, haja visto que esses processos foram diferentes nas áreas 1 e 2. Além disso, como a estrutura espacial também se mostrou dependente da escala de observações, torna-se extremamente difícil a recomendação de um ou outro processo.

Igualmente importante nessas considerações, é o fato da

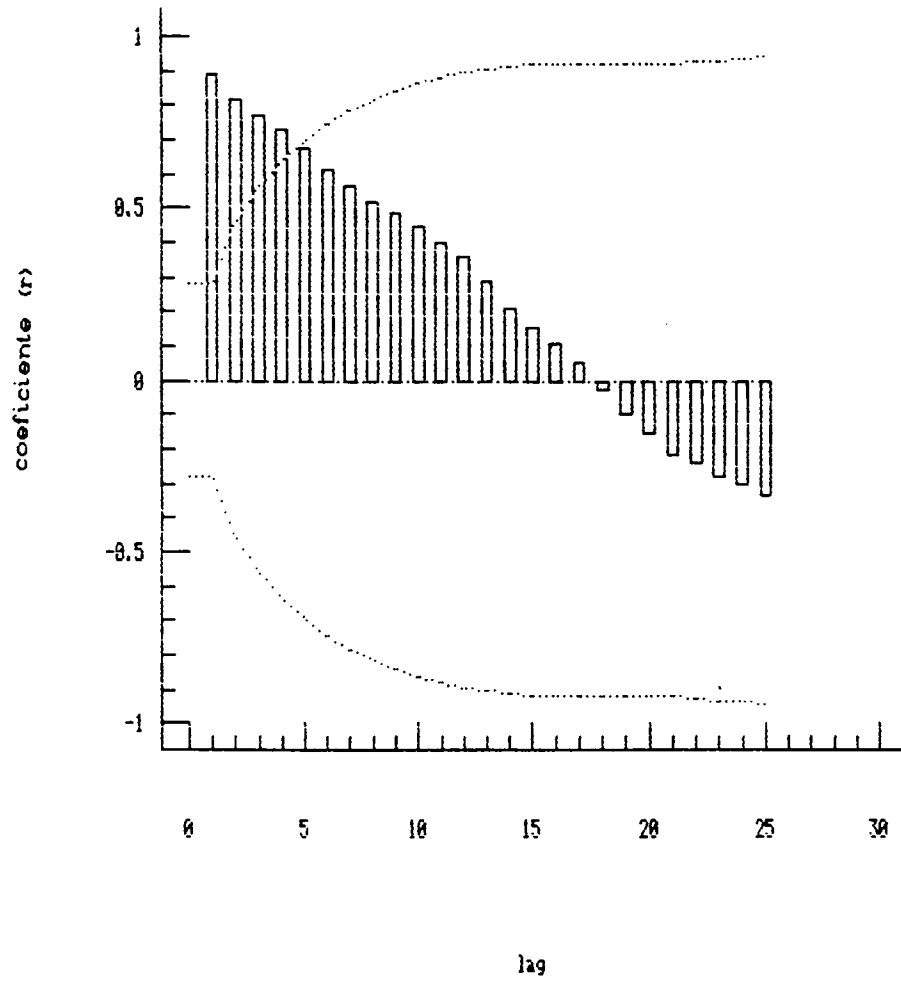


Figura 45. Correlograma da umidade gravimétrica (U) da camada de 0-30cm na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

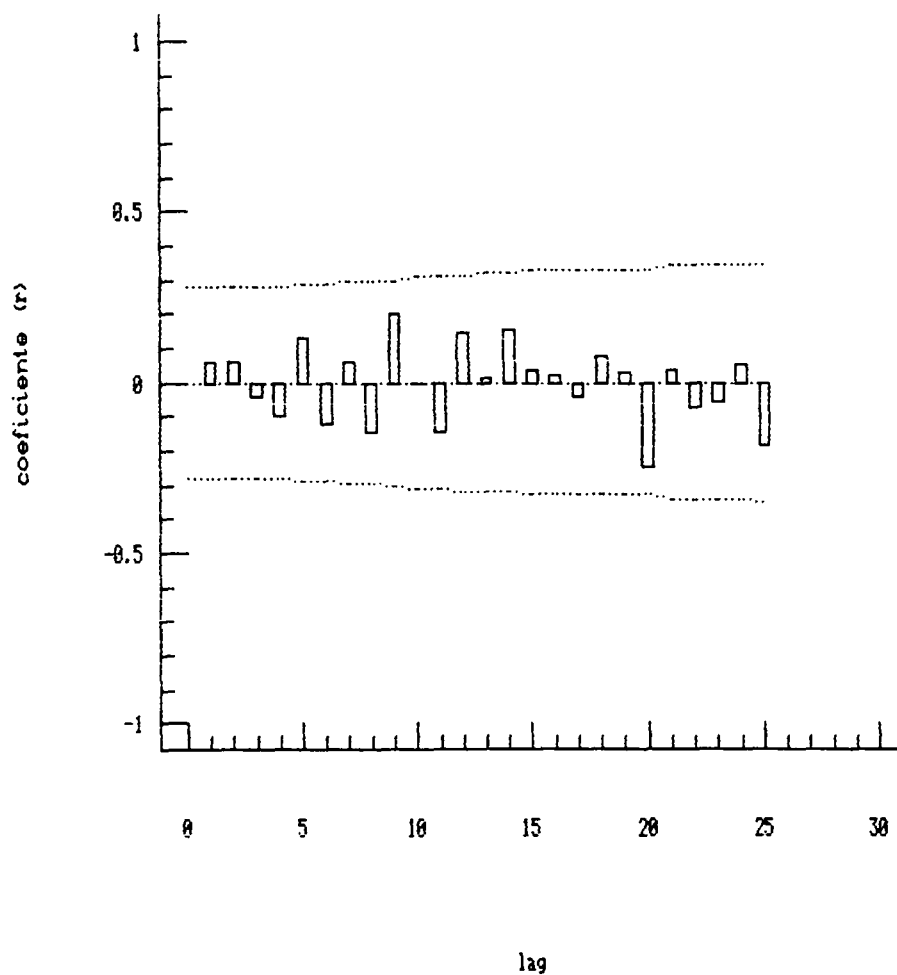


Figura 46. Correlograma da massa específica do solo da camada de 0-15cm [$\rho_s(0-15)$] na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

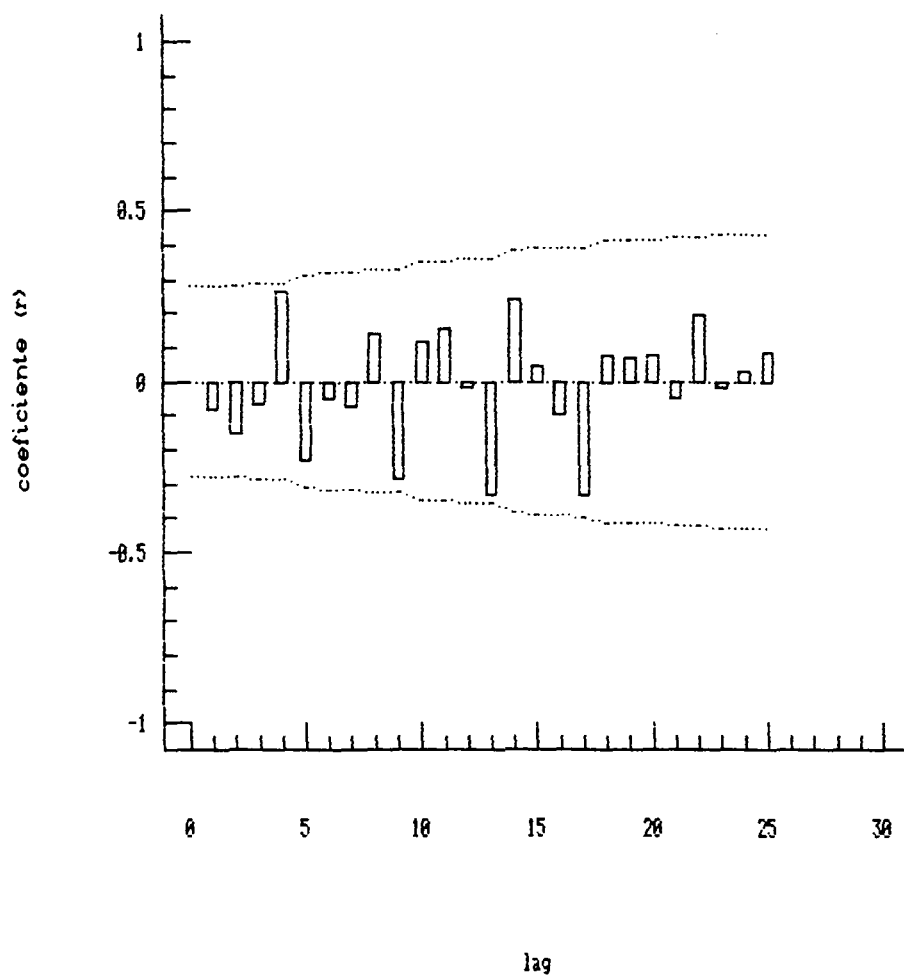


Figura 47. Correlograma da massa específica do solo da camada de 15-30cm [$\rho_s(15-30)$] na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

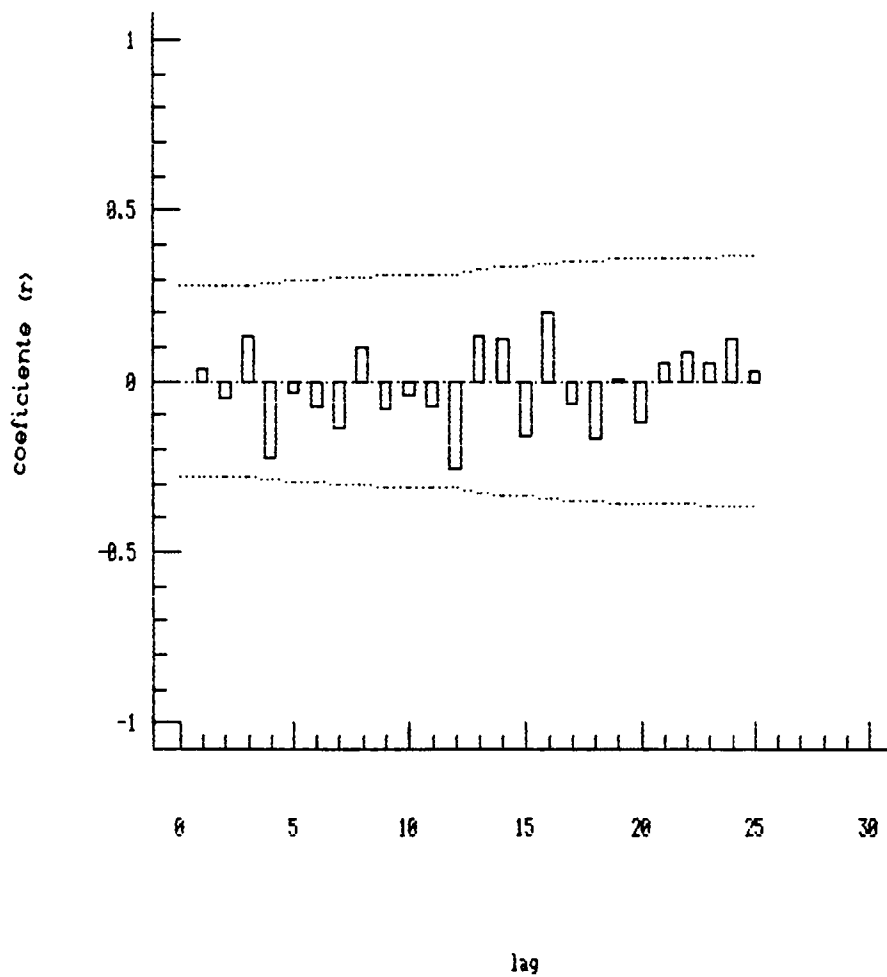


Figura 48. Correlograma da massa específica das partículas da camada de 0-30cm (ρ_p) na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

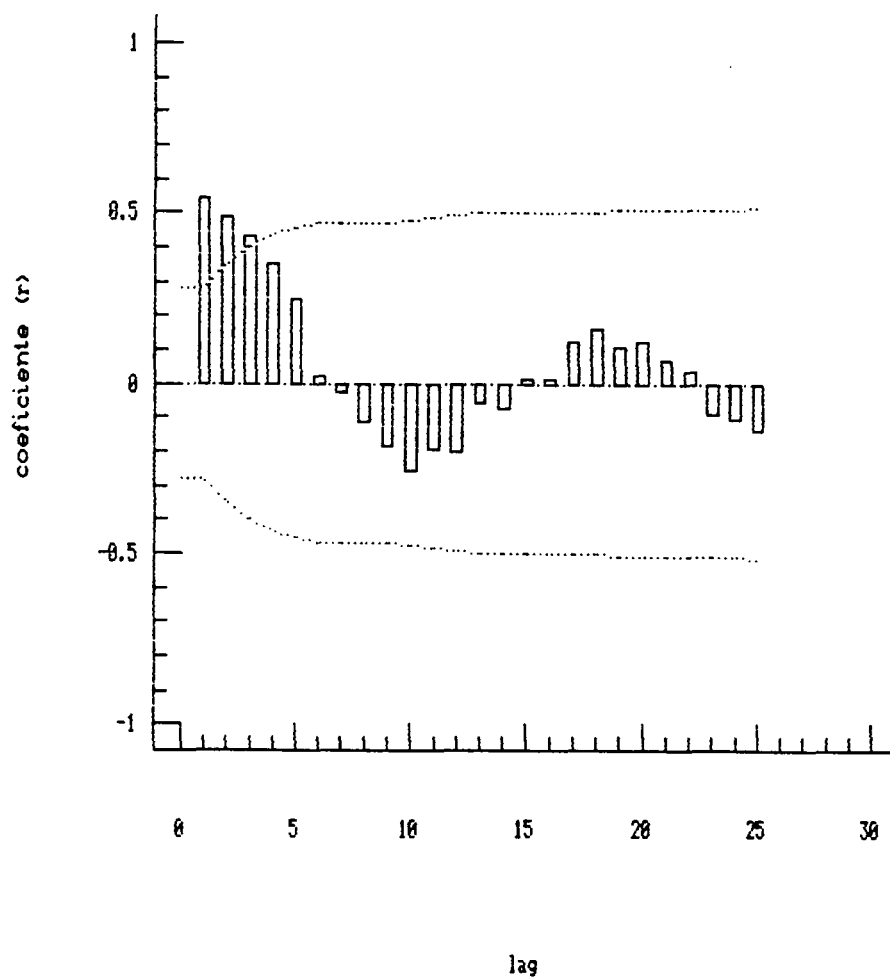


Figura 49. Correlograma da porcentagem de areia da camada de 0-30cm na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1 "lag"=20cm).

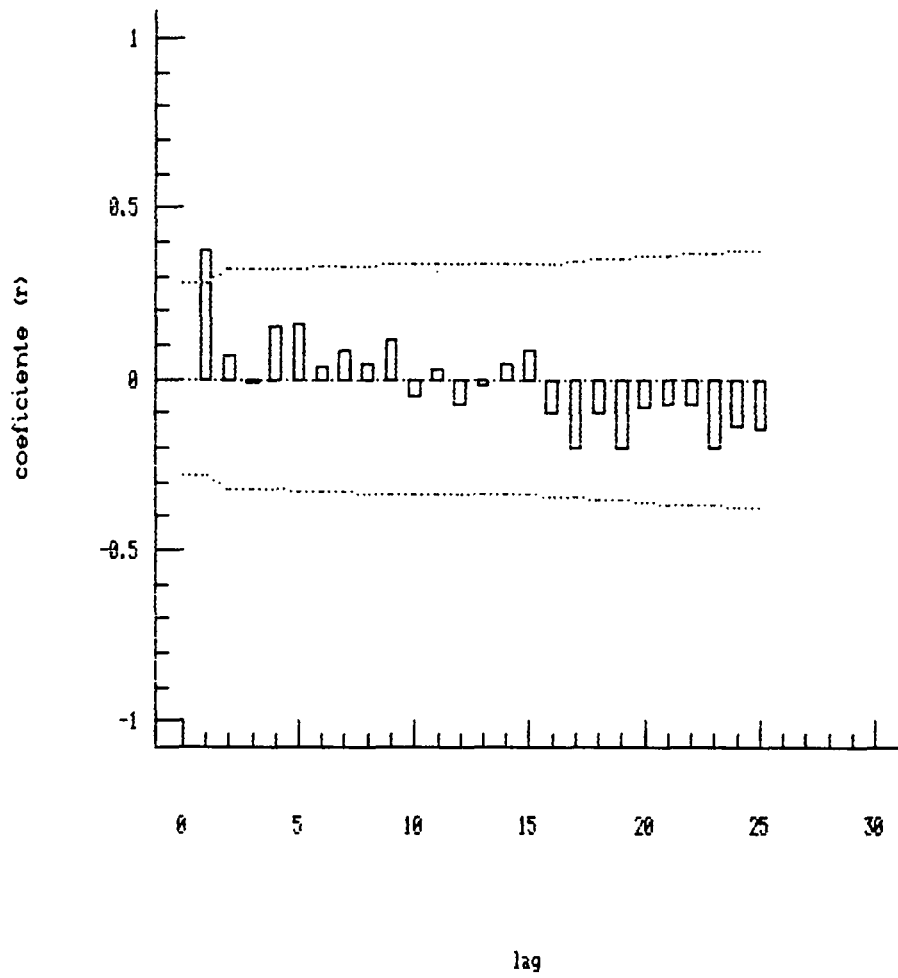


Figura 50. Correlograma da porcentagem de silte da camada de 0-30cm na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

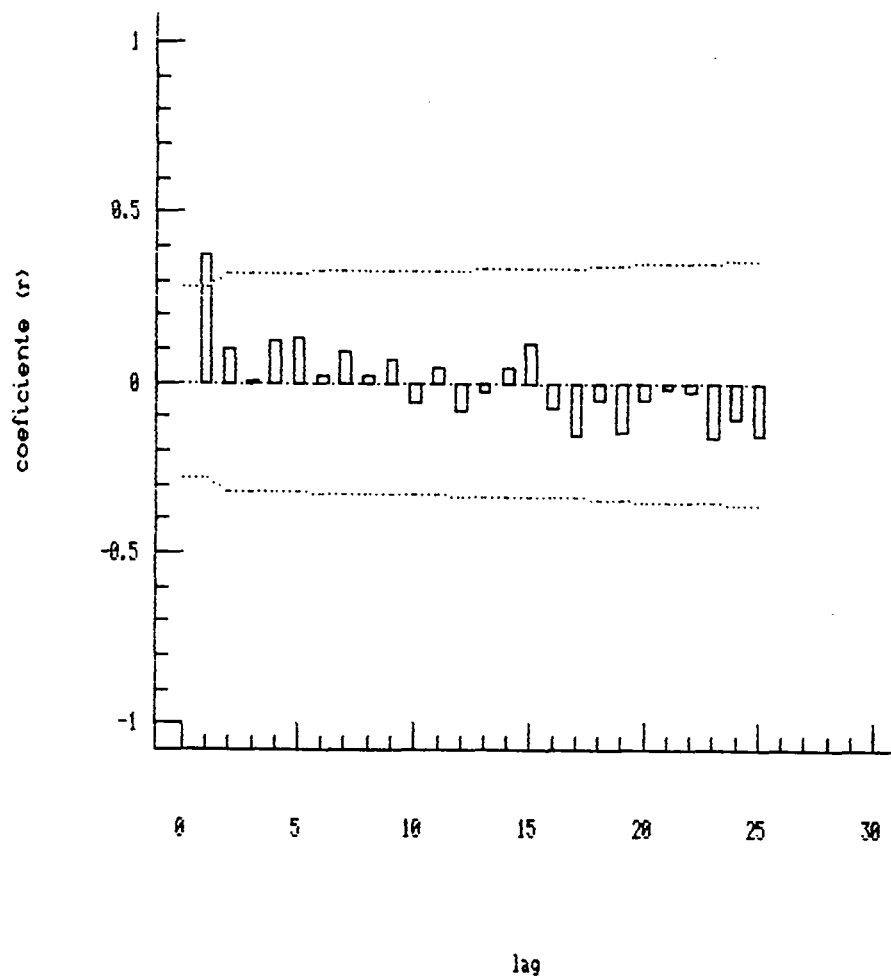


Figura 51. Correlograma da porcentagem de argila da camada de 0-30cm na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

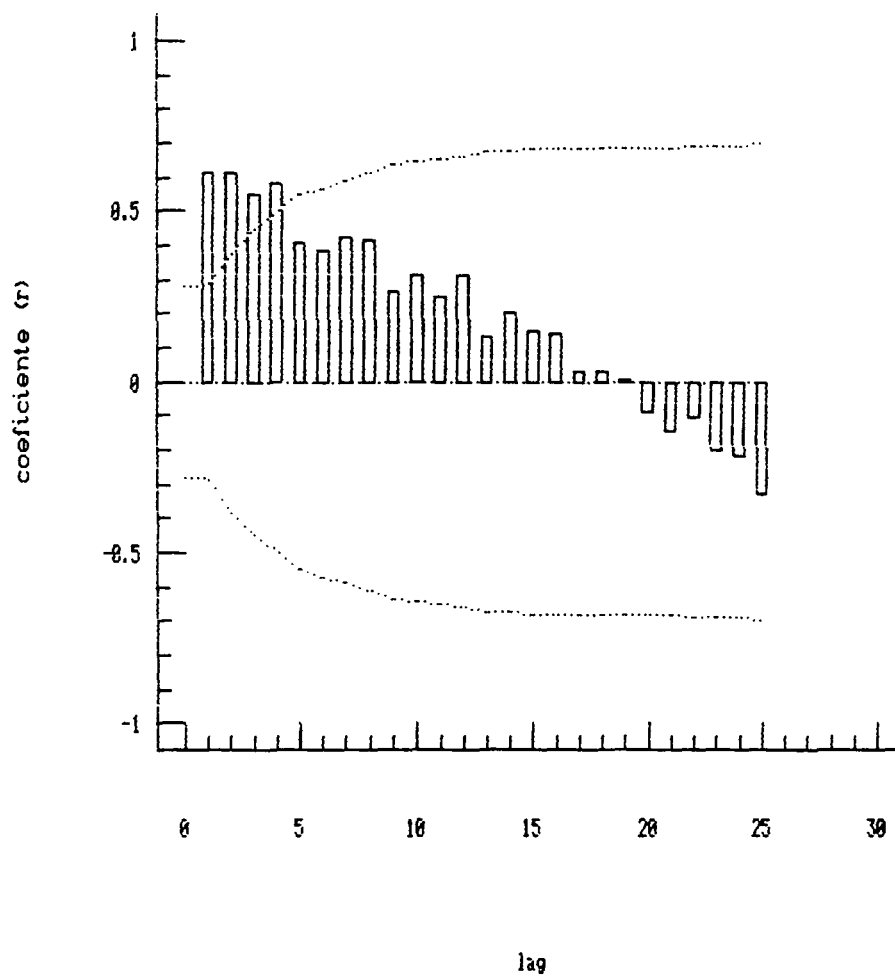


Figura 52. Correlograma do armazenamento de água (A) da camada de 0-30cm na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

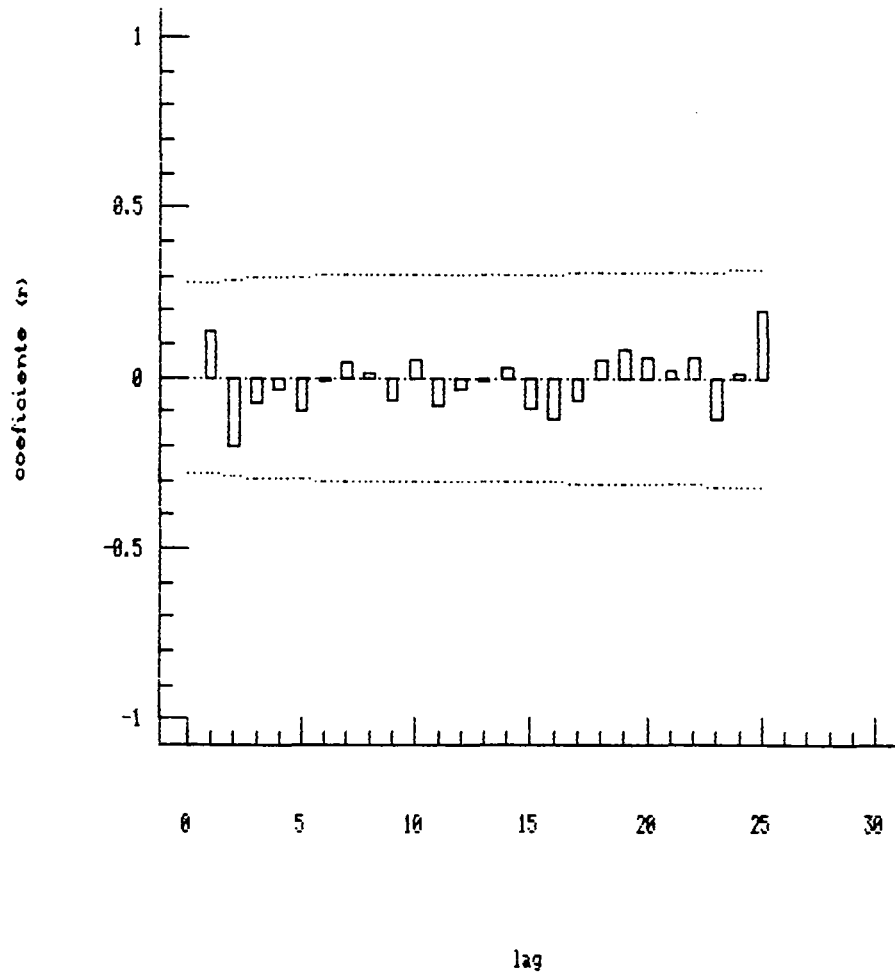


Figura 53. Correlograma da porosidade total (α) da camada de 0-30cm na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

presença de alguma estrutura espacial em determinadas propriedades, mas que aparecem em decorrência daquelas verificadas em outras. É o caso que se observa, por exemplo, nos crosscorrelogramas das figuras 54 e 55 para U e A, ambas em

Quadro 10. Comprimentos da autocorrelação de acordo com os critérios V e E.I., para as propriedades físicas e do pH do solo na transeção da área 1. Espaçamento entre amostragens=20cm.

PARÂMETRO	V(m)	E. I. (m)
U	1,0	1,67
ρ_s (0-15)	0,0	0,0
ρ_s (15-30)	0,0	0,0
ρ_p	0,0	0,0
areia	0,6	0,49
silte	0,2	0,19
argila	0,2	0,2
A	0,9	1,28
α	0,0	0,0

função dos teores de areia. Nota-se que elas se correlacionaram bem no espaço, até o "lag" 4, sentido SE-NW, mas negativamente, isto é, com o aumento no teor de areia, a umidade e o armazenamento de água decresceram.

As figuras 56 e 57 mostram, respectivamente, os autocorrelogramas dos parâmetros altura de plantas de milho e pH do solo. Nota-se que ambos os parâmetros apresentaram dependência espacial e seus comprimentos de autocorrelação podem ser vistos no quadro 11.

Quadro 11. Comprimentos da autocorrelação de acordo com os critérios V e E.I. para pH do solo e alt. plantas de milho na transeção da área 1.

PARÂMETRO	V(m)	E. I. (m)
pH do solo	0,6	1,0
altura de plantas	0,8	1,03

Os crosscorrelogramas entre altura de plantas e U (figura 58), altura de plantas e A (figura 59), e entre altura de plantas e pH (figura 60), sugerem que as boas correlações espaciais obtidas não se devam à uma coincidência ocorrida numa época de amostragem. É provável que tais correlações tenham se manifestado em longos períodos de desenvolvimento da cultura e a razão disso pode ser explicada pela influência que a dependência espacial da areia tenha promovido na umidade (figura 54), no armazenamento (figura 55), e também no pH, como mostra o crosscorrelograma da figura 61. Estes fatos definitivamente reforçam a conclusão de que os processos de recomposição dos solos em áreas mineradas podem promover o aparecimento de determinada estrutura espacial em alguma propriedade física do solo, com conseqüências na magnitude da variação espacial de outras diretamente relacionadas com o produto agrícola explorado. De qualquer forma, os efeitos promovidos pelas técnicas adotadas na recomposição dos solos nas áreas mineradas, foram distintos entre si, no que se refere ao aspecto da estrutura espacial das propriedades físicas, com exceção para $\rho_s(0-15)$ e α , que se mostraram espacialmente independentes inclusive na área não minerada.

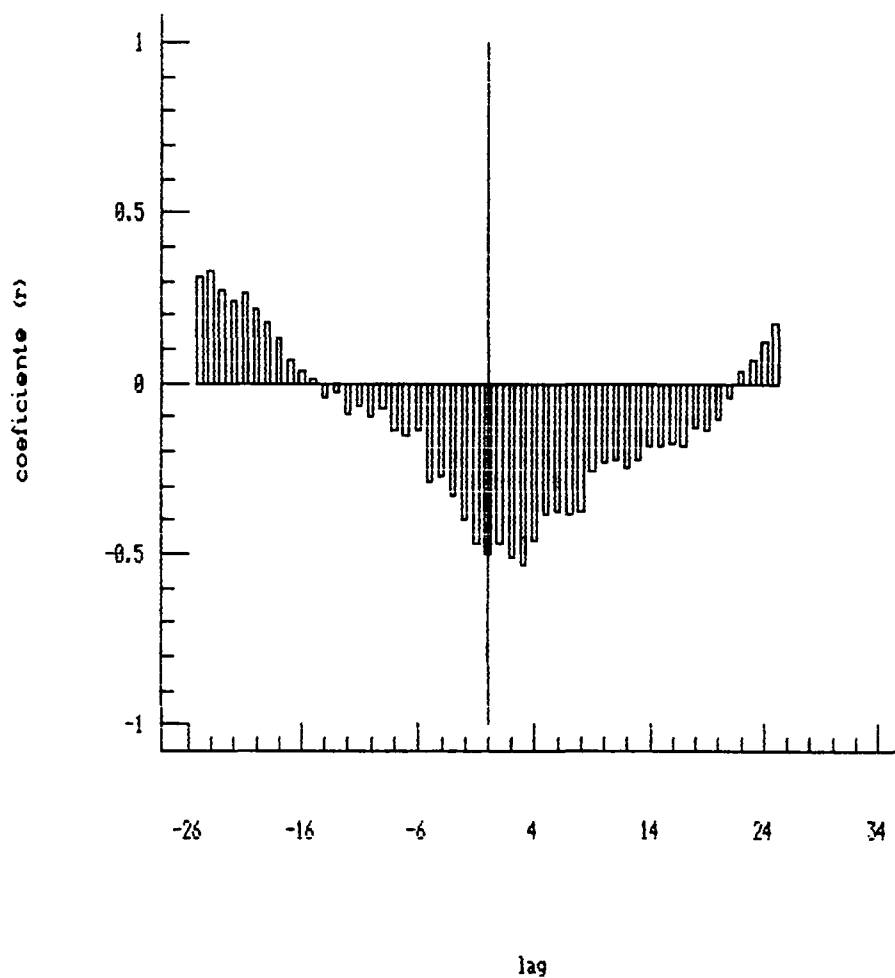


Figura 54. Crosscorrelograma entre umidade gravimétrica (U) e a porcentagem de areia na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm)

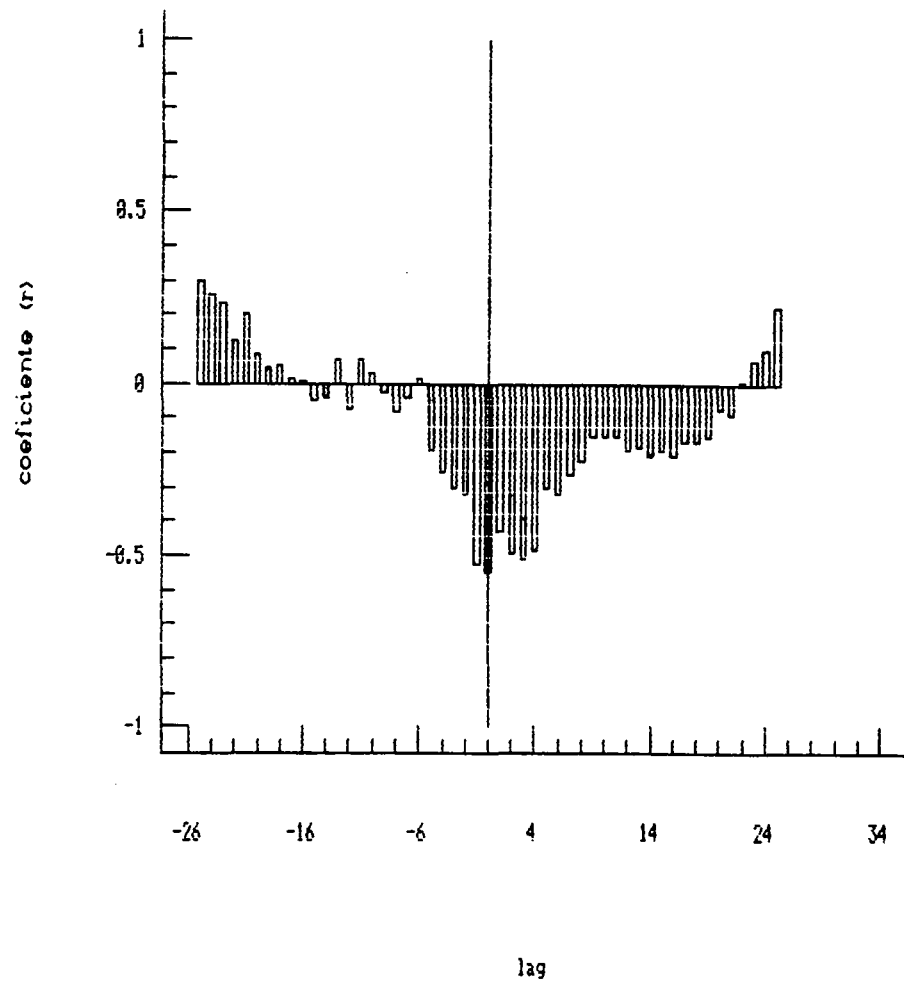


Figura 55. Crosscorrelação entre o armazenamento de água e a porcentagem de areia na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

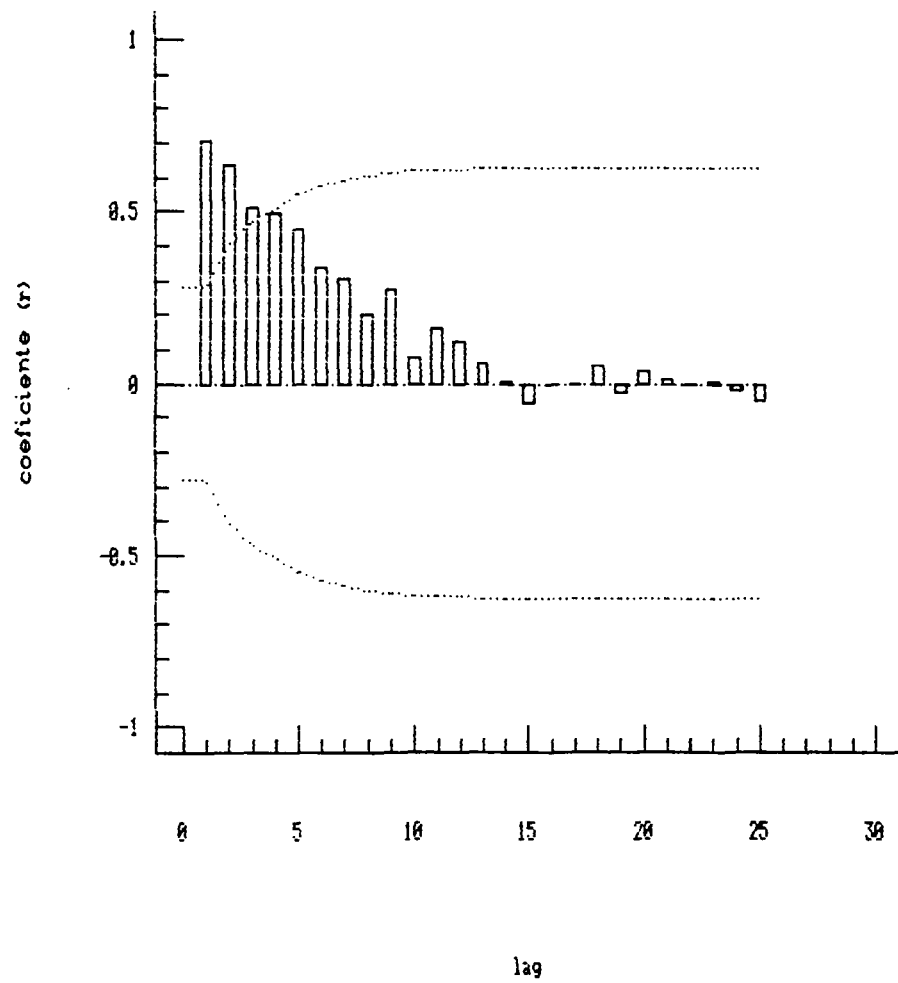


Figura 56. Correlograma da altura de plantas de milho na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

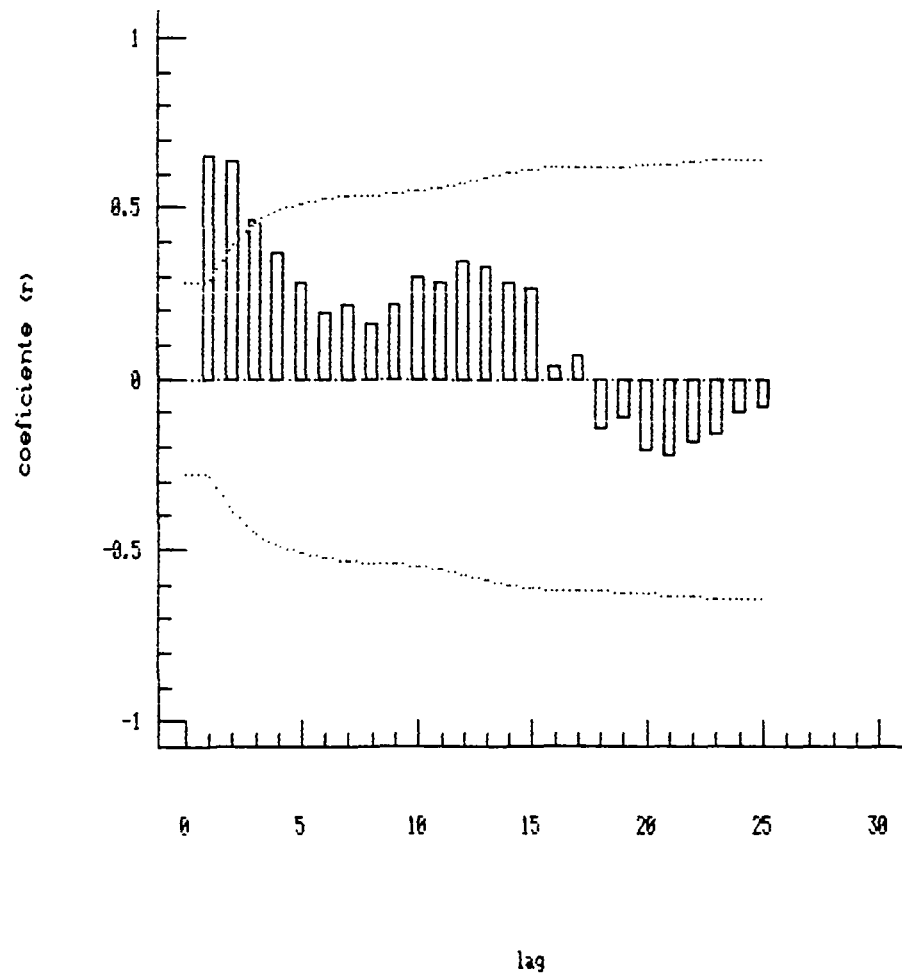


Figura 57. Correlograma do pH da camada de 0-30cm na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

Finalmente, com respeito aos critérios V e E.I. definidos no item 4.3.1, pode-se concluir que primeiro se mostrou satisfatório em 95% dos casos considerados, como atestam os dados de regressão mostrados na figura 62. Com isso, o critério visual gráfico (V) para se quantificar a dependência espacial nos autocorrelogramas, constitui-se numa alternativa prática importante, justamente por não depender da necessidade de ajustes prévios entre os coeficientes r em função do "lag", como impõe a equação (5).

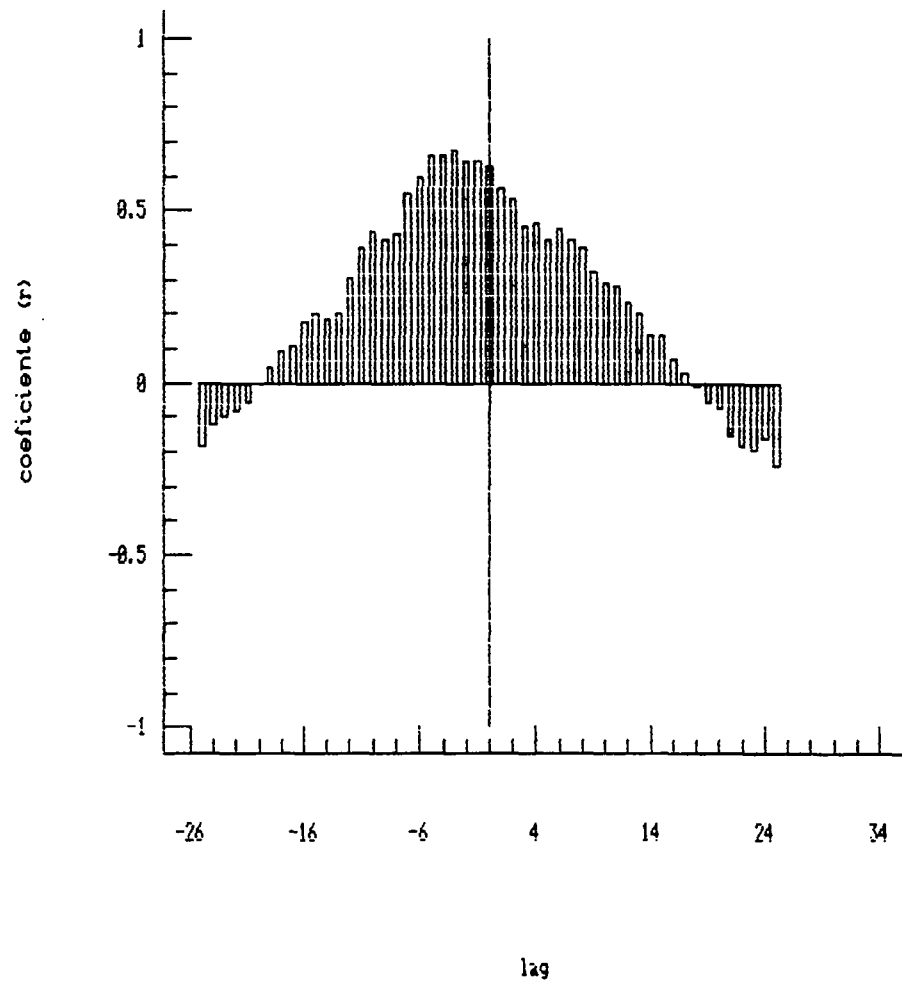


Figura 58. Crosscorrelograma entre a altura de plantas de milho e a umidade gravimétrica na transeção da área 1 para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

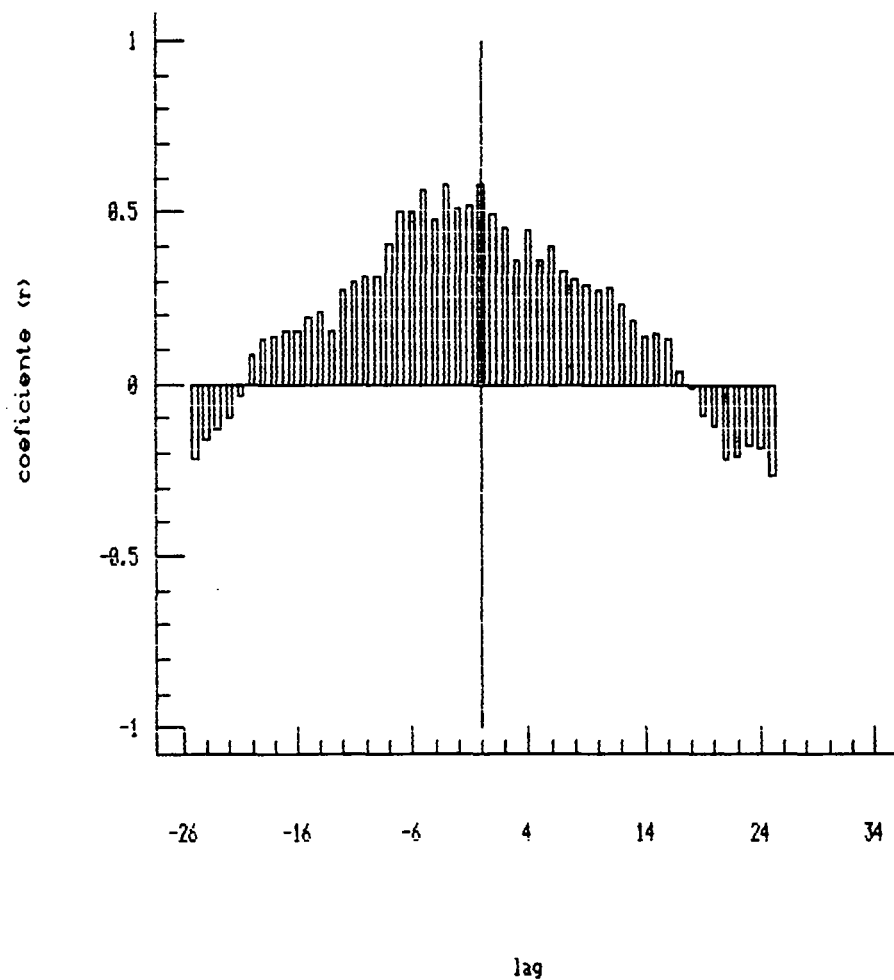


Figura 59. Crosscorrelograma entre a altura de plantas de milho e o armazenamento de água na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20 cm (1"lag"=20cm).

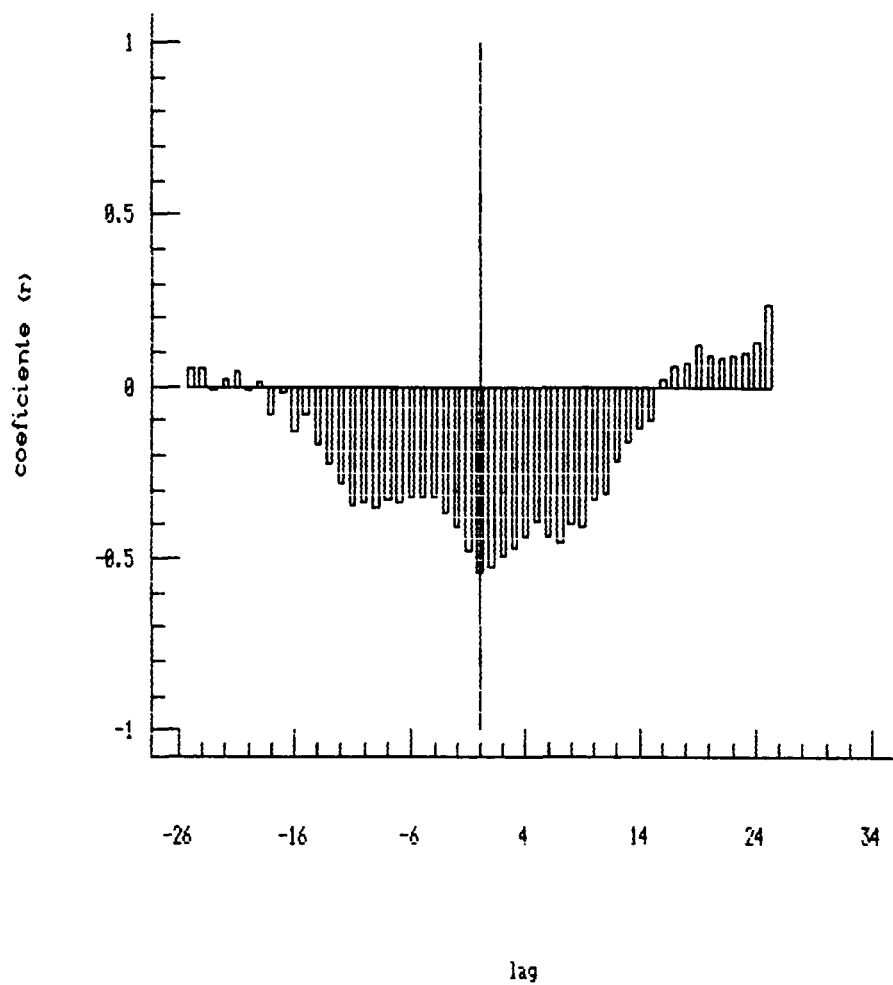


Figura 60. Crosscorrelograma entre a altura de plantas de milho e o pH do solo na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

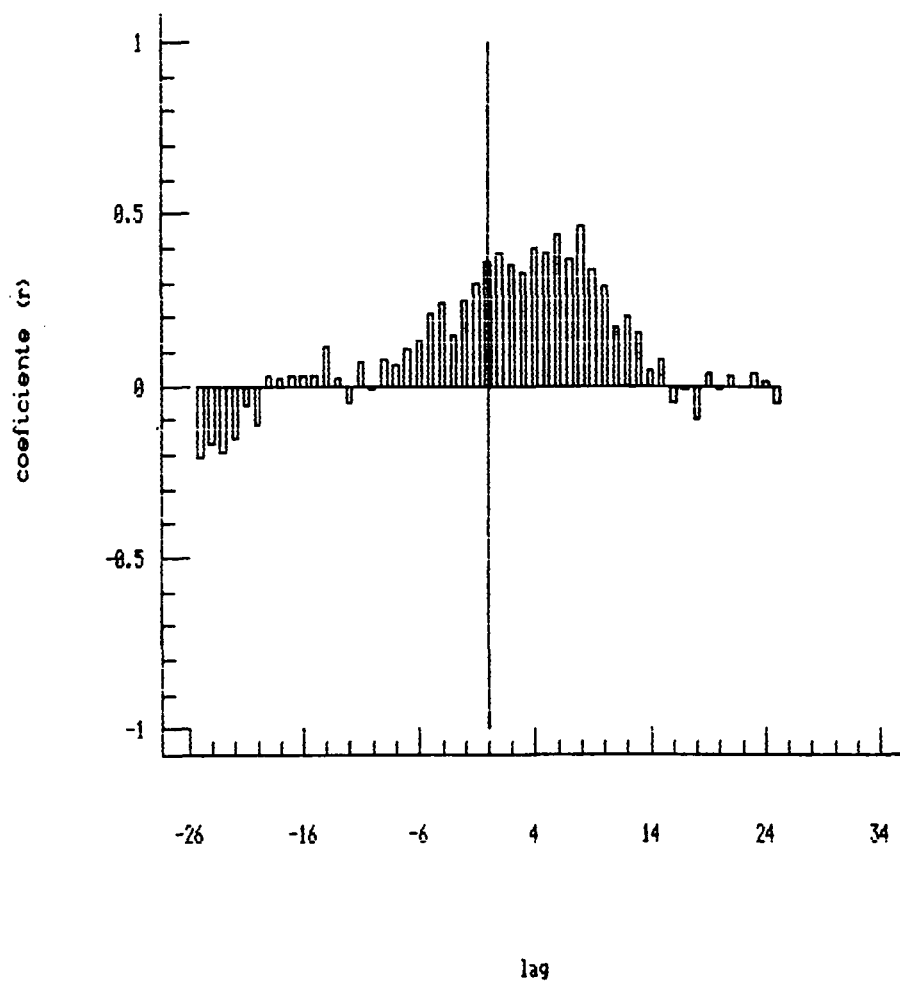


Figura 61. Crosscorrelograma entre o pH e a porcentagem de areia na transeção da área 1, para o espaçamento entre amostragens de 20cm (1"lag"=20cm).

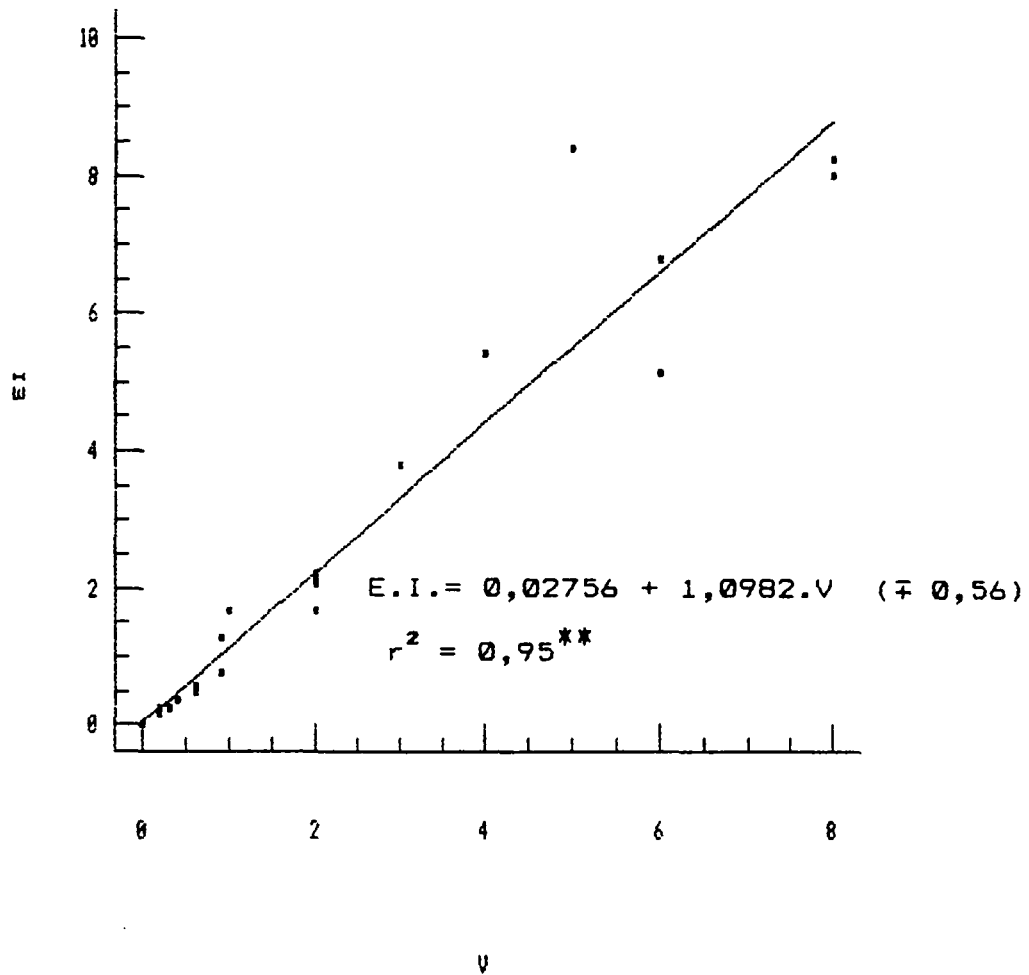


Figura 62. Equação de regressão entre os valores de E.I. em função de V, de acordo com os critérios definidos no item 4.3.1 para o estabelecimento das zonas de influência das variáveis regionalizadas. ** significativa ao nível de 0,1%.

5. CONCLUSÕES

As conclusões deste trabalho foram:

(i) Os efeitos que as técnicas adotadas na recomposição dos solos nas áreas mineradas promoveram na estrutura espacial das propriedades físicas do solo, foram distintas entre si, com exceção para $\rho_s(0-15)$ e α , que se mostraram sem dependência espacial inclusive na área não minerada.

(ii) As técnicas empregadas na recomposição dos solos nas áreas mineradas promoveram alterações na estrutura espacial da areia, com conseqüentes mudanças nas magnitudes das variações espaciais da umidade gravimétrica, armazenamento de água e pH do solo. Na área minerada em reabilitação, adicionalmente, os valores de umidade, armazenamento e pH se correlacionaram espacialmente com a altura de plantas.

(iii) O parâmetro λ na equação (5) mostrou-se tratar de um fator de escala. Como conseqüência, o tamanho de domínio que cada amostra representou na transeção foi dependente do espaçamento entre amostragens, implicando na dificuldade de se apontar o processo preferencial de recomposição do solo e de se selecionar intervalos espaciais em futuros esquemas de amostragens de parâmetros do solo nas áreas estudadas.

(iv) Podem ser cometidos erros apreciáveis ao se generalizar

resultados advindos de um conjunto de valores medidos, quando se assume que o comprimento da autocorrelação é único na transeção, seja pelas altas variâncias associadas aos maiores intervalos entre amostragens, seja pela carência de estacionaridade do sistema.

(v) O critério V para estimar o comprimento da autocorrelação através da observação visual gráfica, considerando a distância a partir da qual os coeficientes de autocorrelação não são significativamente diferentes de zero, apresentou significativa correlação ($r=0,9737$) com o valor E.I. (escala integral), definida pela equação (17).

6. LITERATURA CITADA

- BALL, D. F. & WILLIAMS, W. M. Variability of soil chemical properties in two uncultivated brown earths. J. Soil Sci., 19:379-391, 1968.
- BAKR, A. A.; GELHAR, R. W.; GUTJAHR, A. L. & Mc MILLAN, J. R. Stochastic analysis of variability in surface flows. In. Comparision of one-and three-dimensional flows. Water Resour. Res., Washington, 14: 263-271, 1978.
- BECKET, P. H. T. & WEBSTER, R. Soil variability; a review. Soil and Fertilizer, 34:1-15, 1971.
- BORATTO, F. BASIC para engenheiros e cientistas, 2 ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora, 1984. 120p.
- BOX, T. W. The significance and responsibility of rehabilitating drastically disturbed land. In: SHALLER, F. W. & SUTTON, P. Reclamation of drastically disturbed lands. Madison, American Society of Agronomy, 1978. 317 p.
- BRASIL. Ministério do Exército, D. S. G. Carta Topográfica escala 1:100.000 folha SG 22-X-C-V. São Mateus do Sul. Porto Alegre, 1974.
- BRESLER, E. DAGAN, G. & HANKS, J. Statistical analysis of crop yield under controlled line-source irrigation. J. Am. Soil. Sci. 46(1): 123-132, 1982.
- BURGUESS, T. M. & WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping on soil properties. 1. The semivariogram and punctual kriging. J. of Soil Sci. 31: 315-331, 1980.
- CAMERON, D. D.; NYBOR, M.; TOOGOOD, J. A. & LABERTY, D. H.

- Accuracy of field sampling for soil tests. *Can. J. Soil Sci.*, 51: 165-175, 1971.
- CAMPBELL, J. B. Spatial variability of sand content and pH within continuous delineations of two mapping units. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 460-464, 1978.
- CARTER, M. R. & PEAREN, J. R. General and spatial variability of Solonetzic soils in north central Alberta. *Can. J. Soil Sci.* 65: 157-167, 1975.
- CARVALLO, H. O. & GUEYI, H. R. Spatial variability of soil properties in reclaimed strip-mined lands. *Pesq. Agropec. bras.*, Brasília, 18(11):1249-1256, 1983.
- CASSEL, D. K. & BAVER, A. Variability on soils below depth of tillage. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison, 39: 247-250, 1975.
- CASSEL, D. K. & NELSON, L. A. Spatial and temporal variability of soil physical properties on Norfolk loamy sand as affected by tillage. *Soil and Tillage Research*, 5: 5-17, 1985.
- CLARK, I. *Practical Geostatistics*. London, Applied Science Publishers Ltd. 1979. 129p.
- DAVIS, J. C. *Statistics and data analysis in geology*. New York, John Wiley e Sons, 1973. 550p.
- DELFINER, P. & DELHOME, J. P. Optimum interpolation by kriging. In: *Display and analysis of special data*. London, Wiley, 1975, p. 96-114.
- DELHOME, J. P. Kriging in the hydrosciences. *Adv. Water Resources*. 5: 251-265, 1978.
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. Rio de Janeiro, SNLS.,

1979.

- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Levantamento de Reconhecimento dos solos do Estado do Paraná. Londrina: SUDESUL/EMBRAPA/IAPAR, 1984. 2v. 791p. (Boletim Técnico nº 57).
- ÉRRICO, J. C. D. Elementos de Geoestatística. Poços de Caldas. Alcoa Alumínio S.A., 1984. 114p.
- FOLORUNZO, A. O. Spatial and temporal variability of denitrification fluxes. A stochastic approach. Davis, 1983. 484p. Tese, Doutorado, University of California.
- GAJEM, Y. M.; WARRICK, A. W. & MYERS, D. E. Spatial dependence of physical properties of a Typic Torrifluent soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 45: 709-715, 1981.
- GODOY, H.; CORREA, A. R & SANTOS, D. Clima do Paraná. In: FUNDAÇÃO IAPAR. Manual Agropecuário para o Paraná. Londrina, 1976. p.16-37.
- GUROVICH, L. Estructura de la variabilidad espacial de las propiedades hidrodinamicas de los suelos. Ciência e Inv. Agr., Chile, 9(3): 243-254, 1982.
- GUROVICH, L. & STERN, J. Variabilidad espacial de la velocidad de infiltracion del agua en suelo: analisis geoestadistico y estructura espacial. Ciência e Inv. Agr., Chile, 10: 271-277, 1983a.
- GUROVICH, L. & STERN, J. Variabilidad espacial de la velocidad de infiltracion del agua en suelo: generacion de datos. Ciência e Inv. Afr., Chile, 10: 35-41, 1983b.
- HAJRASULINA, S.; BANIABASSI, N.; METTHEY, J. & NIELSEN, D. R.

- Spatial variability of soil sampling for salinity studies in Southwest Iran. *Irrigation Sci.* Berlin, 1: 197-208, 1980.
- HAMLETT, J. M.; HORTON, R. & CRESSIE, N. A. Resistant and exploratory techniques for use in semivariogram analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 50: 868-875, 1986.
- HAMMOND, L. C.; PRICHETT, W. L. & CHEW, V. Soil sampling in relation to soil heterogeneity. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison, 22: 548-552, 1958.
- HANN, C. T. *Statistical methods in hidrology*. Iowa, University Press, 1977. 378p.
- HARRIS, J. A. Practical universality of field heterogeneity as a factor influencing plot yields. *J. Agr. Res.* XIX (7), 1920.
- HATFIELD, J. L.; MILLARD, J. P. & GOETTLEMAN, R. C. Variability of surface temperature in agricultural fields of central California. *Photogramm. Engng. Remote Sensing*, 48: 1319-1325, 1982.
- I.B.G.E. Folha SH 22 Porto Alegre e parte das folhas SH 21 Uruguaiana e ST 22 Lagoa Mirim: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetacao, uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1986. 796p.
- JOURNELL, A. G. & HUIJBREGTS, Ch.J. *Mining Geostatistics*. London, Academic Press, 1978. 600p.
- KIM, Y. K. *Advanced Geostatistics for Highly Skewed Data*. Dep. Min. Geol. University of Arizona, 1988. Tucson, 200p.
- LANDIM, P. M. B. *Introdução à Geoestatística*. Rio Claro, UNESP, 1985. Publicação didática n° 2, 85p.
- LIBARDI, P. L.; PREVEDELLO, C. L.; PAULETO, E. A. & MORAES, S. O.

Variabilidade espacial da umidade, textura e densidade de partículas ao longo de uma transeção. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 10:85-90, 1986.

LUCCHESI, L. A. C. Influência de sucessões de culturas forrageiras e adubação sobre a recuperação de algumas características de um solo degradado pela mineração do xisto e sobre a sua mesofauna edáfica (Acari e Collembola). Curitiba, 1988, 252p. Tese, Mestrado, Universidade Federal do Paraná.

MAACK, R. Geografia física do Estado do Paraná. Curitiba, BADEP, 1968. 442p.

MARECHAL, A. Geoestatistique et applications minières. In: ROYER, J. J. Cours de Geoestatistique. Nancy, Institute National Polytechnique de Lorraine. Centre D' Enseignement Superieur en Exploration et Valorisation des Ressources Minerales. CESEV. 1977. 78p.

Mc BRATNEY, A. B. & WEBSTER, R. Detection of ridge and furrow pattern by spectral analysis of crop yield. Int. Statistical Review, Great Britain, 49: 45-52, 1981.

Mc BRATNEY, A. B. The role of geostatistics in the design and analysis of field experiments with reference to the effect of soil properties on crop yield. PROCEEDINGS OF A WORKSHOP OF THE ISSS AND SSSA, Las Vegas, 1984. Soil spatial variability, Netherlands, 1985, p. 3-8.

MONTGOMERY, E. G. Experiments in wheat breeding: Experimental error in the nursely and variation in nitrogen and yield. U. S. Dept. Agri. Bur. Plant. Indust. Bul., 1913. 61p. Boletim 269.

MORKOC, F.; BIGGAR, J. W.; MILLAR, R. J. & NIELSEN, D. R.

- Statistical analysis of sorghum yield: A stochastic approach. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, 49(6): 1342-1348. 1985a.
- MORCOK, F.; BIGGAR, J. W.; NIELSEN, D. R. & ROLSTON, D. E. Analysis of soil water and temperature using state-space approach. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, 49(4): 798-803. 1985b.
- MOURA, E. G.; VIEIRA, S. R. & CARVALHO, A. M. Avaliação da capacidade de aeração e de água disponível dos solos de duas transeções na Baixada Ocidental Maranhense. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 16: 7-18. 1992.
- NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. & EHR, K. T. Spatial variability of field measured soil water properties. Hilgardia, Berkely, 42: 215-259, 1973.
- NIELSEN, D. R.; TILLOTSON, P. M. & VIEIRA, S. R. Analysing field-measured soil water properties. Agric. Water Manag., Amsterdam, 6: 93-109, 1983.
- NIELSEN, D. R. & CASSEL, D. K. Soil water management. In: L'ANNUNZIATA, M. F.; LEGG, J. O. ed. Isotopes radiation in agricultural sciences. Soil-Plant-Water relationships. London, Academic Press, 1984. V.1, p.35-64.
- NWADIALO, B. E. & HOLE, F. D. A statistical procedure for partitioning soil transects. Soil Sci., Baltimore, 145: 58-62, 1988.
- O'HALLORAN, I. P.; KACHANOSKI, R. G. & STEWART, W. B. Spatial variability of soil phosphorus as influenced by soil texture and management. Can. J. Soil Sci. 65: 475-487. 1985.
- O'HALLORAN, I. P.; KACHANOSKI, R. G. & STEWART, W. B. Influence of the spatial distribution of sand content on sampling patterns.

- Can. J. Soil Sci. 66: 641-652. 1986.
- PENDLETON, R. L. Are soils mapped under a given type by the Bureau of Soils method closely similar to one another? Univ. Calif. Publ. Agric. Sci., 3: 369-498. 1919
- PREVEDELLO, C. L. Teoria das variáveis regionalizadas aplicada à ciência do solo. Seminário apresentado ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração "Solos e Nutrição de Plantas", ESALQ, Piracicaba, não publicado, 35p. 1986.
- PREVEDELLO, B. M. S. Variabilidade espacial de parâmetros de solo e planta. Piracicaba, 1987, 166p. Tese, Doutorado. ESALQ, USP.
- REICHARDT, K.; KIRDA, C.; ZAPATA, F.; HARDARSON, G & AXMANN, H. Evaluation of soil water and plant nitrogen status by nuclear techniques. In: PROCEEDINGS OF THE REGIONAL WORKSHOP ON NUCLEAR TECHNIQUES IN CROP PRODUCTION. Piracicaba, CENA, 1984. p 239-246.
- REICHARDT, K. ; VIEIRA, S. R. & LIBARDI, P. L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 10: 85-90, 1986.
- ROBINSON, G. W. & LLOYD, W. E. On the probable error of sampling in soil surveys. J. Agric. Science, 7: 144-153. 1915.
- RUSSO, D. & BRESLER, E. Soil hydraulic properties as stochastic processes In: An analysis of field spatial variability. Soil Sci. Amer. J., 45: 682-687, 1991.
- SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. & VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de resistência à penetração de um Latossolo Vermelho

- Escuro ao longo de um traçado ("Transect"). R. bras. Ci. Solo, Campinas, 13: 1-5, 1989.
- SISSON, J. B. & WIERENGA, P. J. Spatial variability of steady-state infiltration rates as a stochastic process. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, 45: 699-704, 1981.
- SOUZA, M. L. P.; RACHWAL, M. F. G.; AMARAL, M. B. & CURCIO, G. R.;
- SOUZA, L. C. P. Levantamento de solos e aptidão das terras de áreas de mineração- Blocos I, II e III (1700ha) da Petrobras-São Mateus do Sul, Paraná. Curitiba: FUPEF, 1988. 137p.
- SOUZA, M. L. P.; AMARAL M. B. & SIVIERO, A. G. Estudo da recuperação de solos degradados pela mineração. Convênio UFPR/PETROBRAS-SIX. Relatório de pesquisa não publicado. 1989, 86 p.
- STATGRAPHICS. Statistical Graphics System, versão 2.3, STSC Inc. and Statistical Graphics Corporation, USA, (programa computacional) 1987.
- STERN, J. Nonuniform sprinkler irrigation and yield. Jerusalem, 1981, Dissertação, Mestrado, Hebrew University of Jerusalem.
- TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S. & UEHARA, G. Application of Geostatistic to spacial studies of soil properties. Advances in Agronomy, 38: 45-94. Academic Press, Orlando, 1985.
- UEHARA, G.; TRANGMAR, B. B. & YOST, R. S. Spatial variability of soil properties. PROCEEDINGS OF WORKSHOP OF THE ISSS AND THE SSSA, Las Vegas, 1984. Soil spatial variability, Netherlands, 1985. p. 61-95.
- VAN DER BERG, M. Pedological and geomorphological aspects of the

- alluvial plains of the Ribeira Valley (São Paulo, Brazil). Wageningen, Holanda., 1985. 102 p. Dissertação, Mestrado. Agriculture University.
- VAUCLIN, M.; VIEIRA, S. R.; BERNARD, R. & HATFIELD, J. L. Spatial variability of surface temperature along two transects of a bare soil. *Water Resour. Res.*, Washington, 18: 1677-1686, 1982.
- VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R. & BIGGAR, J. W. Spatial variability of field measured infiltration rate. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 45: 1040-1048, 1981.
- VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; BIGGAR, J. W. & NIELSEN, D. R. Geostatistic theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, Berkeley, 1983. 76 p.
- VIEIRA, S. R.; REYNOLDS, W. D. & TOPP, G. C. Spatial variability of hydraulic properties in a highly clay soil. In: WIERENGA, P. J.; BACHELET, D. eds. *Validation of flow and transport models for the unsaturated zone: Conference Proceeding*, May 23-26, 1988, New Mexico. Las Cruces, NM. Departement of Agronomy and Horticulture, New Mexico State University, 1988, 550p.
- VOLPI, G. & GAMBOLATI, G. Use of the main trend for de kriging technique in hydrology. *Adv. Water Res.* 1: 345-349, 1978.
- XU, J; WEBSTER, R. A geoestatistical study of topsoil properties in Zhangwu county, China. *Catena*, Braunschweig, 11: 13-26, 1984.
- WAGENET, R. J. Measurement and interpretation of spatially variable leaching processes. *PROCEEDINGS OF A WORKSHOP OF THE ISSS AND SSSA*, Las Vegas, 1984. Soil spatial variability,

- Netherlands, 1985. p. 209-235.
- WAYNICK, D. D. Variability in soils and its significance to past and future soil investigations. In: Statistical study of nitrification in soils. Univ. Cal. Publ. Agr. Sci., 3: 240-270, 1918.
- 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. p. 319-344.
- WARRICK, A. W.; MYERS, D. E. & NIELSEN D. R. Geostatistical methods applied to soil science. In: SSSA Methods of soil analysis. Part I. Physical and mineralogical methods. Agronomy monograph n° 9: 53-82. 1986.
- WEBSTER, R. & CUANALO, DE LA, H. E. Soil transect correlograms of North Oxfordshire and their interpretation. J. Soil Sci., Oxford, 26: 176-194, 1975.
- WEBSTER, R. Spectral analysis of Gilgai-Aust. J. Soils Res., 15: 191-204, 1977.
- WEBSTER, R. & BURGUESS, T. M. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. III. Changing drift and universal kriging. J. of Soil Sci. 31: 505-524, 1980.
- WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in field. New York, Springer-Verlag, New York, Advances soil Science, 1985, 69p.
- WIERENGA, P. J. Spatial variability of soil water properties in irrigated soils. PROCEEDINGS OF A WORKSHOP OF THE ISSS AND SSSA, Las Vegas, 1984. Soil Spatial variability, Netherlands,

1985. p. 166-194.

WOLLUM, A. G. & CASSEL, D. K. Spatial variability of *Rhizobium japonicum* in two North Carolina soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 48: 1082-1086, 1984.

YOST, R. S.; UEHARA, G. & FOX, R. L. Geoestatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46: 1028-1032. 1982.

ZAMBERLAN, E. & VIANA, R. A. Reabilitação de área minerada de xisto. *B. tecn. Petrobras, Rio de janeiro*, 31(1):53-57, 1988.

ANEXO 1

VALORES OBTIDOS DOS PARÂMETROS ESTUDADOS NA TRANSEÇÃO DA
ÁREA 1, PARA O ESPAÇAMENTO DE AMOSTRAGENS DE 20CM.

obs.	U	ρ_s	ρ_s	ρ_p	areia	silte	argila
		(0-15)	(15-30)		%	%	%
	%	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	%	%	%
1	37.01	1.095	1.070	2.673	3.81	9.30	86.89
2	37.73	1.193	1.040	2.776	3.50	7.25	89.25
3	36.21	1.076	1.168	2.593	3.44	6.45	90.12
4	35.07	1.096	1.176	2.644	3.72	13.08	83.21
5	35.61	1.178	1.066	2.672	3.54	8.55	87.91
6	35.55	1.108	1.113	2.684	3.53	11.27	85.20
7	35.26	1.101	1.072	2.688	4.00	10.22	85.78
8	34.20	1.060	1.050	2.716	3.72	13.54	82.74
9	33.24	1.191	1.028	2.773	3.61	15.89	80.50
10	34.12	1.049	1.214	2.781	3.78	14.40	81.82
11	34.87	1.203	1.180	2.848	3.60	15.54	80.85
12	34.13	1.246	1.079	2.799	4.61	14.25	81.14
13	34.93	1.041	1.068	2.626	3.59	14.24	82.17
14	36.13	1.098	1.236	2.766	3.14	11.24	85.63
15	35.30	0.910	1.176	2.701	3.79	13.32	82.90
16	34.81	1.103	0.955	2.638	3.17	11.19	85.64
17	33.75	1.159	1.156	2.812	3.71	15.67	80.62
18	36.25	1.136	1.161	2.753	2.95	16.02	81.03
19	34.80	1.036	1.086	2.701	3.63	18.21	78.16
20	34.10	1.083	1.115	2.772	2.94	12.53	84.53
21	35.14	1.196	1.047	2.713	2.90	11.50	85.60
22	32.93	1.133	1.126	2.730	3.15	16.79	80.06
23	32.57	1.197	1.150	2.818	3.28	13.96	82.76
24	31.71	1.146	1.152	2.686	3.17	18.30	78.53
25	32.99	1.173	1.200	2.763	3.25	14.43	82.32
26	31.99	1.157	1.192	2.725	3.52	16.63	79.85
27	31.78	1.111	0.908	2.724	3.63	15.49	80.87
28	32.92	1.035	1.198	2.749	4.04	16.42	79.54
29	30.15	1.006	1.115	2.288	4.15	15.11	80.74
30	30.90	1.195	1.052	2.700	4.56	14.80	80.64
31	29.71	1.088	0.910	2.803	4.25	12.99	82.77
32	29.99	1.143	1.095	2.732	4.60	12.29	83.11
33	28.74	1.161	1.146	2.765	4.48	19.50	76.01
34	27.99	1.123	1.166	2.784	4.56	15.24	80.20
35	28.00	1.230	1.103	2.736	3.81	13.59	82.60
36	30.85	1.167	1.208	2.745	3.94	13.03	83.03
37	30.54	1.068	1.104	2.690	4.46	9.91	85.62
38	30.02	1.193	1.138	2.772	3.73	13.68	82.59
39	28.51	1.148	1.129	2.788	3.39	17.87	78.74
40	29.38	1.268	1.279	2.794	3.57	18.52	77.91
41	29.57	1.189	1.039	2.850	3.67	11.46	83.87
42	28.60	1.208	1.154	2.738	3.98	8.03	87.99
43	28.80	1.127	1.097	2.635	4.35	10.48	85.17
44	28.18	1.139	1.203	2.801	3.36	12.96	83.68
45	27.91	1.128	1.110	2.691	3.99	11.15	84.85
46	29.13	1.058	1.161	2.689	4.12	10.00	85.88
47	29.01	1.166	1.141	2.736	4.05	13.39	82.56
48	29.14	1.182	1.175	2.672	3.93	20.38	75.69
49	30.37	1.149	1.119	2.722	4.18	12.13	83.69
50	29.85	1.127	1.087	2.754	4.63	9.83	85.55
51	29.57	1.172	0.944	2.700	4.25	13.45	82.31

obs	A	α	pH solo	alt. plantas
	cm	cm ³ /cm ³	-	cm
1	12.024	0.5948	4.4	214
2	12.642	0.5976	4.8	198
3	12.189	0.5673	4.7	209
4	11.952	0.4297	5.1	198
5	11.985	0.5801	4.8	220
6	11.843	0.5861	4.7	229
7	11.493	0.5956	5.3	222
8	10.824	0.6116	5.0	237
9	11.069	0.5997	5.7	204
10	11.587	0.5930	4.9	217
11	12.464	0.5815	5.7	210
12	11.903	0.5815	4.5	234
13	11.050	0.5982	4.7	211
14	12.649	0.5781	4.5	192
15	11.045	0.6138	4.4	160
16	10.746	0.6099	4.5	165
17	11.719	0.5882	4.7	206
18	12.495	0.5826	4.7	166
19	11.077	0.6072	4.9	184
20	11.243	0.6035	4.6	180
21	11.823	0.5864	5.4	190
22	11.158	0.5864	5.7	186
23	11.466	0.5834	5.7	185
24	10.930	0.5722	6.0	190
25	11.748	0.5704	5.6	196
26	11.272	0.5688	6.5	203
27	9.625	0.6292	5.6	134
28	11.027	0.5937	6.0	190
29	9.592	0.5363	5.1	193
30	10.415	0.5837	5.3	206
31	8.904	0.6436	5.4	201
32	10.068	0.5904	5.3	195
33	9.945	0.5826	5.9	183
34	9.610	0.5887	6.1	170
35	9.799	0.5735	6.0	160
36	10.990	0.5672	6.8	145
37	9.949	0.5963	6.4	174
38	10.496	0.5794	6.6	174
39	9.738	0.5915	5.4	171
40	11.225	0.5965	5.3	168
41	9.882	0.6091	6.0	168
42	10.133	0.5687	5.8	169
43	9.608	0.5780	6.0	170
44	9.899	0.5819	5.5	137
45	9.369	0.5842	6.0	140
46	9.696	0.5872	5.4	145
47	10.038	0.5782	6.3	144
48	10.302	0.5588	6.8	142
49	10.332	0.5834	6.1	143
50	9.913	0.5980	6.5	147
51	9.386	0.6081	6.9	150

ANEXO 2

VALORES OBTIDOS DOS PARÂMETROS ESTUDADOS NA TRANSEÇÃO DA
ÁREA 2, PARA O ESPAÇAMENTO DE AMOSTRAGENS DE 20CM.

obs.	U	ρ_s (0-15)	ρ_s (15-30)	ρ_p	areia	silte	argila	A	α
	%	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	%	%	%	cm	cm ³ /cm ³
1	36.67	1.081	1.146	2.951	4.53	17.05	78.42	12.25	0.6225
2	36.59	1.071	1.106	2.930	3.96	15.60	80.44	11.95	0.6283
3	38.61	1.124	1.101	3.005	3.81	16.85	79.35	12.89	0.6296
4	37.75	1.111	1.066	2.962	4.22	18.88	76.90	12.33	0.6323
5	36.48	1.062	0.911	2.918	4.53	15.47	80.00	10.80	0.6618
6	38.77	1.154	0.967	2.924	3.59	18.59	77.81	12.34	0.6371
7	39.88	1.061	1.152	2.955	4.43	10.54	85.03	13.24	0.6250
8	41.40	1.080	1.025	2.912	4.35	17.50	78.15	13.07	0.6175
9	38.11	1.170	0.991	2.753	4.95	11.94	83.10	12.35	0.6073
10	33.79	1.022	0.968	2.965	4.44	14.89	80.68	10.19	0.6644
11	41.19	1.056	1.051	2.872	3.96	13.97	82.07	13.02	0.6330
12	34.48	1.093	1.159	2.812	5.78	18.15	76.07	11.65	0.5996
13	34.22	1.071	1.215	2.921	5.71	19.40	74.89	11.73	0.6087
14	36.68	1.053	1.078	2.834	4.10	10.95	84.96	11.73	0.6240
15	36.15	1.089	1.087	2.921	4.38	17.32	78.31	11.80	0.6275
16	39.29	1.053	1.141	2.943	4.64	14.97	80.39	12.93	0.6273
17	36.91	0.963	1.162	2.797	4.35	18.10	77.56	11.54	0.6200
18	40.10	1.114	1.137	2.888	4.06	21.20	74.74	13.54	0.6101
19	41.55	1.026	1.259	2.780	4.54	19.87	75.59	14.24	0.5888
20	40.09	0.981	1.104	2.813	4.95	19.72	75.33	12.54	0.6292
21	38.22	1.006	1.163	3.049	4.80	16.95	78.25	12.43	0.6441
22	38.20	1.031	1.174	3.118	4.06	18.13	77.82	12.64	0.6462
23	38.36	1.010	1.172	3.022	4.16	19.04	76.80	12.56	0.6390
24	39.09	1.025	1.143	2.563	4.00	19.56	76.44	12.71	0.5771
25	38.09	1.081	1.108	3.017	4.52	21.97	73.50	12.51	0.6371
26	37.89	1.086	1.074	3.011	3.54	20.62	75.84	12.28	0.6413
27	39.39	1.090	1.039	2.876	4.60	22.70	72.68	12.58	0.6297
28	39.84	1.098	1.107	2.819	4.81	20.71	75.28	13.18	0.6147
29	40.70	1.090	1.098	2.863	5.54	23.06	74.48	13.36	0.6179
30	40.06	1.014	1.023	2.812	5.28	20.82	71.04	12.24	0.6376
31	38.60	1.099	1.002	2.991	4.75	20.19	75.06	12.20	0.6486
32	40.56	1.090	1.159	2.980	4.96	19.01	76.02	13.68	0.6225
33	38.80	1.063	1.126	2.876	4.70	19.30	76.00	12.73	0.6193
34	21.44	1.086	0.960	2.839	5.64	19.74	74.61	6.58	0.6397
35	40.41	1.012	1.114	2.810	6.84	21.34	71.82	12.89	0.6217
36	35.65	1.041	1.022	2.894	4.18	25.44	70.38	11.03	0.6434
37	39.32	1.085	1.040	2.888	5.96	20.42	73.62	12.53	0.6319
38	35.49	1.032	1.073	2.858	6.90	25.83	67.27	11.21	0.6316
39	34.68	1.246	1.118	2.914	4.08	19.72	76.21	12.30	0.5944
40	34.55	1.143	1.097	2.829	4.43	25.71	69.87	11.61	0.6041
41	33.19	1.070	1.030	2.863	3.96	25.87	70.17	10.46	0.6333
42	33.00	1.083	1.049	2.914	3.70	11.82	84.48	10.55	0.6343
43	33.56	1.099	1.095	2.954	4.69	10.08	85.24	11.05	0.6286
44	37.32	0.953	1.072	2.966	3.83	13.09	83.08	11.34	0.6585
45	37.18	1.039	1.043	2.963	3.74	7.15	89.11	11.61	0.6487
46	39.98	1.024	1.154	3.016	4.16	21.69	74.14	13.06	0.6389
47	24.73	0.960	1.032	2.966	3.86	16.48	79.66	7.39	0.6642
48	39.43	1.006	1.200	2.876	3.96	18.33	77.21	13.05	0.6165
49	38.08	0.976	1.179	2.897	4.12	15.26	80.62	12.29	0.6286
50	39.60	0.986	1.199	2.939	4.64	18.20	77.16	12.98	0.6281
51	41.88	1.131	1.185	2.955	4.34	17.00	78.66	14.55	0.6081

ANEXO 3

VALORES OBTIDOS DOS PARÂMETROS ESTUDADOS NA TRANSEÇÃO DA
ÁREA 2, PARA O ESPAÇAMENTO DE AMOSTRAGENS DE 200CM.

obs.	U	ρ_s	ρ_s	ρ_p	areia	silte	argila	A	α
		(0-15)	(15-30)		%	%	%		
	%	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	%	%	%	cm	cm ³ /cm ³
1	39.70	1.110	1.176	2.775	3.61	15.72	80.67	13.613	0.5881
2	40.31	1.208	1.160	3.094	3.92	16.09	80.00	14.318	0.6173
3	41.01	1.031	1.071	3.005	3.14	14.39	82.48	12.930	0.6502
4	45.71	1.114	1.042	3.002	3.40	21.86	74.74	14.783	0.6409
5	45.25	1.181	1.177	3.136	2.01	11.08	86.91	16.005	0.6240
6	45.48	1.136	1.152	2.929	1.65	9.12	89.23	15.609	0.6134
7	43.98	1.142	1.143	2.987	4.04	24.41	71.55	15.074	0.6173
8	43.86	1.131	1.170	2.852	2.54	12.08	85.38	15.145	0.5964
9	43.38	1.121	1.190	2.995	3.65	13.16	83.19	15.038	0.6140
10	45.26	1.132	1.171	3.056	2.32	10.47	87.21	15.635	0.6230
11	39.46	1.013	0.965	2.960	2.54	13.24	84.22	11.708	0.6659
12	43.77	1.108	1.011	3.131	1.92	11.24	86.85	13.912	0.6615
13	44.92	1.065	1.047	2.938	2.80	21.67	75.53	14.231	0.6406
14	43.70	1.063	1.087	3.082	2.02	8.74	89.24	14.093	0.6512
15	47.14	1.151	1.192	3.000	2.69	9.87	87.44	16.567	0.6093
16	45.75	0.996	1.069	2.972	2.86	8.60	88.54	14.171	0.6524
17	44.14	1.120	1.113	3.027	2.92	13.21	83.87	14.785	0.6310
18	42.19	1.085	1.154	2.863	3.84	32.06	64.10	14.170	0.6088
19	39.06	1.083	1.183	2.954	4.01	21.58	74.41	13.277	0.6165
20	32.90	1.111	1.038	2.832	5.16	26.55	68.29	10.605	0.6204
21	35.96	1.124	1.152	3.230	4.57	19.65	75.78	12.277	0.6477
22	36.28	1.079	1.119	2.881	5.35	16.47	78.18	11.962	0.6185
23	39.89	1.123	1.168	2.974	5.04	17.47	77.49	13.708	0.6147
24	38.77	0.981	0.967	2.924	3.59	18.59	77.81	11.329	0.6669
25	39.29	1.022	1.141	2.943	4.64	14.97	80.39	12.748	0.6324
26	37.89	1.032	1.082	3.011	3.54	20.62	75.84	12.015	0.6490
27	35.65	1.041	1.022	2.894	4.18	25.44	70.38	11.032	0.6434
28	39.98	1.024	1.154	3.016	4.16	21.69	74.14	13.062	0.6389
29	39.15	1.010	1.110	2.954	2.77	16.43	80.81	12.450	0.6412
30	39.43	1.092	1.067	2.938	4.09	10.97	84.94	12.728	0.6338
31	39.19	0.969	1.119	3.038	4.19	17.89	77.92	12.274	0.6564
32	36.84	1.081	1.171	3.073	3.75	14.16	82.09	12.445	0.6336
33	37.05	1.049	1.162	3.027	3.31	10.43	86.26	12.288	0.6346
34	34.70	1.041	1.134	3.017	4.95	7.34	87.72	11.321	0.6394
35	34.38	0.995	1.024	2.956	3.73	8.95	87.32	10.412	0.6583
36	39.48	1.027	0.959	2.959	3.46	15.34	81.19	11.761	0.6644
37	39.47	1.130	1.042	3.136	3.47	10.26	86.27	12.859	0.6537
38	39.37	1.030	0.962	3.084	3.54	9.40	87.07	11.764	0.6770
39	37.69	1.164	0.978	2.912	4.06	10.35	85.59	12.110	0.6322
40	39.58	1.028	1.026	2.935	3.61	13.13	83.26	12.195	0.6501
41	42.76	0.982	0.925	3.073	2.84	13.95	83.21	12.232	0.6896
42	40.03	1.084	1.068	3.032	4.50	17.84	77.66	12.922	0.6451
43	37.13	1.092	1.133	3.021	4.30	16.74	78.96	12.392	0.6316
44	38.04	1.078	1.008	2.951	5.06	18.02	76.92	11.903	0.6466
45	37.11	1.002	1.079	2.905	5.13	15.61	79.26	11.584	0.6417
46	38.57	1.055	1.064	2.951	4.46	15.79	79.75	12.260	0.6408
47	39.49	0.908	1.002	2.897	4.93	14.48	80.59	11.314	0.6704
48	47.48	1.025	1.081	2.915	3.90	13.02	83.08	14.999	0.6388
49	45.69	1.005	1.060	3.011	3.32	7.77	88.91	14.153	0.6570
50	39.19	1.078	1.105	2.778	3.77	9.23	87.00	12.839	0.6069
51	33.97	1.090	1.120	2.987	5.15	18.96	75.89	11.261	0.6301

ANEXO 4

VALORES OBTIDOS DOS PARÂMETROS ESTUDADOS NA TRANSEÇÃO DA
ÁREA 3, PARA O ESPAÇAMENTO DE AMOSTRAGENS DE 20CM.

obs.	U	ρ_s	ρ_s	ρ_p	areia	silte	argila	A	α
		(0-15)	(15-30)						
	%	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	%	%	%	cm	cm ³ /cm ³
1	47.68	0.877	0.868	2.651	1.68	15.79	82.53	12.480	0.6707
2	46.63	0.903	0.730	2.770	1.83	14.17	84.00	11.422	0.7051
3	47.20	0.859	0.815	2.660	2.63	15.72	81.65	11.851	0.6853
4	48.32	0.856	0.844	2.651	2.31	17.60	80.09	12.322	0.6794
5	48.57	0.961	0.847	2.635	2.58	16.84	80.58	13.172	0.6569
6	47.47	0.819	0.816	2.720	2.99	18.15	78.85	11.642	0.6993
7	47.45	0.820	0.764	2.760	2.38	15.44	82.18	13.650	0.7130
8	47.02	0.943	0.832	2.710	2.82	17.98	79.20	12.519	0.6723
9	47.63	0.834	0.723	2.631	2.53	19.53	77.93	11.124	0.7039
10	46.65	1.020	0.922	2.690	2.57	21.79	75.65	13.589	0.6390
11	44.69	0.937	0.882	2.700	2.60	23.17	74.23	12.194	0.6630
12	49.13	0.957	0.885	2.689	2.67	20.61	76.71	13.575	0.6575
13	45.38	0.846	0.849	2.658	2.40	23.27	74.33	11.538	0.6810
14	45.70	0.905	0.867	2.646	2.68	20.38	76.94	12.147	0.6652
15	47.97	0.917	0.847	2.508	2.60	15.54	81.86	12.692	0.6483
16	55.24	0.900	0.761	2.665	1.62	23.34	75.05	13.763	0.6882
17	54.25	0.897	0.774	2.566	2.69	18.10	79.21	13.599	0.6742
18	48.39	0.927	0.799	2.660	1.98	20.79	77.23	12.528	0.6756
19	48.39	0.899	0.878	2.577	2.23	19.05	78.72	12.898	0.6550
20	45.76	0.976	0.886	2.577	2.73	19.33	77.94	12.781	0.6387
21	44.20	0.878	0.912	2.621	2.98	17.11	79.92	11.868	0.6585
22	44.42	0.915	0.872	2.669	3.55	17.89	78.56	11.907	0.6688
23	47.27	0.904	0.900	2.655	2.73	19.37	77.89	12.791	0.6603
24	46.01	0.904	0.895	2.778	2.86	22.86	74.58	12.416	0.6760
25	46.79	0.912	0.881	2.739	2.65	18.23	79.12	12.584	0.6725
26	45.89	0.900	0.860	2.743	3.70	16.69	79.61	12.115	0.6792
27	46.51	0.899	0.847	2.751	2.95	16.18	80.87	12.181	0.6827
28	45.85	0.890	0.833	2.824	3.78	17.22	79.00	11.850	0.6948
29	49.10	0.888	0.825	2.835	3.22	18.03	78.75	12.616	0.6977
30	46.08	0.950	0.836	2.721	3.15	17.67	79.17	12.345	0.6718
31	48.17	0.954	0.851	2.774	3.36	18.26	78.36	13.042	0.6745
32	47.48	0.939	0.933	2.831	3.24	19.61	77.14	13.332	0.6694
33	47.07	0.952	0.905	2.803	3.26	17.80	78.94	13.111	0.6686
34	47.05	0.915	0.853	2.883	3.50	18.10	78.40	12.478	0.6934
35	49.55	0.917	0.758	2.666	4.30	20.28	75.43	12.449	0.6857
36	47.35	0.920	0.867	2.821	3.13	17.73	79.14	12.692	0.6831
37	46.84	0.997	0.767	2.780	2.85	17.16	79.99	12.394	0.6827
38	47.26	0.962	0.834	2.837	3.36	20.46	76.18	12.732	0.6835
39	48.83	0.939	0.847	2.736	2.83	16.76	80.41	13.082	0.6736
40	47.09	0.934	0.825	2.744	2.94	16.41	80.64	12.425	0.6793
41	46.82	0.942	0.855	2.784	2.97	17.76	79.27	12.620	0.6771
42	48.29	0.820	0.881	2.691	2.41	21.03	76.56	12.321	0.6838
43	48.38	0.886	0.851	2.758	2.68	18.39	78.92	12.460	0.6885
44	49.99	0.889	0.849	2.751	2.53	16.17	81.31	13.032	0.6841
45	48.77	0.837	0.865	2.704	2.42	18.84	78.83	12.451	0.6853
46	48.98	0.925	0.794	2.911	3.77	18.09	78.13	12.629	0.7046
47	48.45	0.840	0.848	2.784	2.74	17.71	79.55	12.268	0.6968
48	46.04	0.943	0.854	2.703	2.74	17.76	79.51	12.410	0.6674
49	49.16	0.934	0.881	2.709	3.12	17.02	79.86	13.384	0.6661
50	46.75	0.928	0.864	2.871	3.28	19.11	77.61	12.566	0.6879
51	46.39	0.921	0.902	2.757	2.91	18.40	78.68	12.685	0.6692

ANEXO 5

VALORES OBTIDOS DOS PARÂMETROS ESTUDADOS NA TRANSEÇÃO DA
ÁREA 3, PARA O ESPAÇAMENTO DE AMOSTRAGENS DE 200CM.

obs.	U	ρ_s (0-15)	ρ_s (15-30)	ρ_p	areia	silte	argila	A	α
	%	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³	%	%	%	cm	cm ³ /cm ³
1	46.41	0.800	0.760	2.660	3.13	23.76	73.11	10.860	0.7068
2	49.09	0.853	0.762	2.653	3.25	17.94	78.81	11.892	0.6954
3	48.85	0.850	0.805	2.662	3.18	21.64	75.17	12.127	0.6890
4	49.58	0.864	0.911	2.730	3.25	21.49	75.26	13.201	0.6747
5	43.88	0.892	0.779	2.665	3.44	21.20	75.36	10.999	0.6863
6	41.68	0.792	0.790	2.518	3.40	24.50	72.11	9.891	0.6859
7	44.20	0.838	0.801	2.535	3.10	24.15	72.75	10.867	0.6765
8	47.74	0.883	0.811	2.616	3.25	23.09	73.65	12.131	0.6762
9	46.74	0.926	0.820	2.710	3.13	21.95	74.93	12.241	0.6779
10	47.47	0.670	0.780	2.693	3.45	21.60	74.95	10.325	0.7308
11	48.95	0.768	0.765	2.468	3.34	27.19	69.48	11.256	0.6892
12	47.75	0.837	0.849	2.644	3.37	23.15	73.48	12.076	0.6812
13	46.90	0.814	0.801	2.624	3.40	21.26	75.34	11.362	0.6921
14	45.40	0.845	0.841	2.647	3.20	20.96	75.84	11.482	0.6815
15	50.46	0.736	0.824	2.653	3.25	21.11	75.65	11.808	0.7059
16	46.77	0.868	0.789	2.660	3.45	26.32	70.24	11.625	0.6883
17	47.55	1.015	0.841	2.693	3.82	20.56	75.63	13.238	0.6554
18	46.25	0.780	0.835	2.707	2.72	19.46	77.82	11.204	0.7015
19	46.61	0.839	0.871	2.688	2.38	19.50	78.12	11.955	0.6819
20	47.80	0.867	0.814	2.686	2.92	20.73	76.35	12.053	0.6869
21	46.16	0.697	0.805	2.615	2.41	13.78	83.81	10.400	0.7128
22	47.38	0.914	0.723	2.651	2.46	20.93	76.61	11.634	0.6911
23	45.45	0.949	0.794	2.769	1.91	13.73	84.37	11.883	0.6851
24	47.47	0.819	0.816	2.720	2.99	18.15	78.85	11.642	0.6993
25	55.24	0.900	0.761	2.665	1.62	23.34	75.05	13.763	0.6881
26	45.89	0.910	0.841	2.743	3.70	16.69	79.61	12.060	0.6806
27	47.35	0.920	0.867	2.821	3.13	17.73	79.14	12.692	0.6831
28	48.98	0.925	0.794	2.911	3.77	18.09	78.13	12.629	0.7046
29	51.23	0.914	0.714	2.832	2.63	21.28	76.08	12.510	0.7126
30	49.05	0.884	0.770	2.704	2.52	15.26	82.22	12.169	0.6942
31	47.22	0.896	0.858	2.874	2.51	18.41	79.08	12.424	0.6949
32	48.40	0.837	0.841	2.775	3.04	15.11	81.85	12.182	0.6977
33	47.55	0.937	0.795	2.803	2.98	12.33	84.69	12.353	0.6911
34	49.63	0.935	0.888	2.796	2.77	13.30	83.94	13.571	0.6738
35	47.78	0.974	0.881	2.827	2.84	13.05	84.11	13.295	0.6717
36	52.77	0.921	0.861	2.852	3.59	14.35	82.06	14.105	0.6876
37	49.37	0.779	0.892	2.793	3.87	8.42	87.70	12.375	0.7007
38	44.23	0.988	0.966	2.842	2.82	16.87	80.31	12.964	0.6562
39	45.25	1.020	0.956	2.828	2.92	15.37	81.71	13.412	0.6506
40	40.53	0.617	0.669	2.767	3.23	17.60	79.16	12.921	0.7676
41	45.50	0.963	0.858	2.799	2.98	15.33	81.69	12.428	0.6745
42	43.14	1.008	0.866	2.642	2.75	17.48	79.77	12.127	0.6453
43	44.81	1.015	0.963	2.714	3.47	20.29	76.24	13.295	0.6356
44	49.72	0.968	0.933	2.801	3.26	22.33	74.42	14.178	0.6605
45	48.86	0.994	0.890	2.788	3.28	18.28	78.44	13.808	0.6621
46	49.38	0.954	0.786	2.804	2.74	18.88	78.38	12.888	0.6897
47	47.97	0.955	0.864	2.625	2.86	18.27	78.87	13.088	0.6533
48	52.06	0.705	0.850	2.732	3.45	17.85	78.70	12.143	0.7152
49	33.66	0.975	0.912	2.430	3.01	23.83	73.16	9.527	0.6115
50	46.69	0.947	0.925	2.679	3.10	20.49	76.40	13.111	0.6506
51	44.20	0.890	0.873	2.912	2.85	18.90	78.24	11.689	0.6971