

UFRRJ
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO

TESE

**Variabilidade Espacial e Temporal
de Características Morfológicas do
Sistema Radicular de Gramíneas Forrageiras**

Felipe da Costa Brasil

2005



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DE
CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DO SISTEMA
RADICULAR DE GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS**

FELIPE DA COSTA BRASIL

Sob a Orientação do Professor
Roberto Oscar Pereyra Rossiello

e Co-orientação da Professora
Maria do Rosário G. Oliveira

e do Pesquisador
Sidney Rosa Vieira

Tese submetida como requisito
parcial para obtenção do grau de
Doutor em Ciências em
Agronomia, Área de Concentração
em Ciência do Solo

Seropédica, RJ
Fevereiro de 2005

633.2
B823v
T

Brasil, Felipe da Costa, 1975-
Variabilidade espacial e temporal de
características morfológicas do sistema
radicular de gramíneas forrageiras /
Felipe da Costa Brasil. - 2005.
137f.

Orientador: Roberto Oscar Pereyra
Rossiello.

Tese(doutorado) - Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Instituto de
Agronomia.

Bibliografia: f. 113-123.

1. Plantas forrageiras - Raízes -
Teses. 2. Plantas forrageiras - Morfologia
- Teses. 3. Gramínea - Raízes - Teses. 4.
Geologia - Métodos estatísticos - Teses.
I. Rossiello, Roberto Oscar Pereyra. II.
Universidade Federal Rural do Rio de
Janeiro. Instituto de Agronomia. III.
Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – CIÊNCIA DO SOLO

FELIPE DA COSTA BRASIL

Tese submetida ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia, área de Concentração em Ciência do Solo, como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Ciências**, em Agronomia.

TESE APROVADA EM 21/02/2005

Roberto Oscar Pereyra Rossiello. Dr. UFRRJ
(Orientador)

Sidney Rosa Vieira Ph.D. IAC.
(Co-orientador)

Everaldo Zonta. Dr. UFRRJ

Leônidas Valle.Ph.D. EMBRAPA-Solos

Adelson Paulo de Araújo Dr. UFRRJ

DEDICATÓRIA

Esta tese é dedicada

Ao meu querido e amado pai, Garibalde Brasil, que Deus o tenha.

À minha mãe, Ana Maria da Costa Brasil, o sustentáculo de nossa família.

Às minhas queridas irmãs, Fabiana e Fernanda e Gisele Brasil.

E à minha querida Amanda Teixeira Fonseca.

AGRADECIMENTOS

A Deus, inteligência suprema e causa primária de todas as coisas.

Aos meus amados pais, e minhas adoráveis irmãs, pelo amor, compreensão, esperança, perdão e carinho dispensados a mim durante todos estes anos.

A todos os meus familiares que de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

À minha querida companheira de todas as horas Amanda Teixeira Fonseca, pelo amor, amizade, trabalho e dedicação a mim durante este período.

Ao meu orientador, Roberto Oscar Pereyra Rossiello, pela orientação e trabalho dispensados durante esta etapa de minha vida.

A Professora Maria do Rosário Gamito Oliveira, por toda a amizade, dedicação e carinho durante a orientação do trabalho na Universidade de Évora em Portugal.

Ao pesquisador Sidney Rosa Vieira (IAC), por sua valiosa orientação no uso das ferramentas da geoestatística e pela confiança depositada durante este trabalho.

Ao professor Adelson Paulo Araújo, pela sua valiosa amizade e respeito, e grandiosa contribuição com sugestões prestadas durante a análise estatística deste trabalho.

Ao professor Everaldo Zonta, por ser um grande amigo, e pela sua ajuda e grande contribuição em todas as fases do trabalho, principalmente nos momentos mais difíceis desta jornada.

À professora Lucia Helena Cunha dos Anjos, coordenadora do CPGA-CS, pela amizade e carinho, e principalmente pela confiança durante estes anos de trabalho e convivência.

Aos Professores Rui Machado, Nuno Ribeiro, José Calado Barros, Ricardo Freixal, Calado, Ermelinda, Mario de Carvalho e Paulo Palma do departamento de Fitotecnia da Universidade de Évora pela amizade e carinho durante o convívio do estágio de Doutoramento.

Ao amigo e professor Marcos Gervasio Pereira, pela amizade desde os anos de minha graduação.

Ao professor João Batista R. de Abreu, pela valiosa convivência e orientação durante este trabalho.

A querida amiga e companheira de trabalho Eng^a Célia Toureiro pela valiosa colaboração durante todo o trabalho na Universidade de Évora.

Aos grandes amigos e companheiros de muitas noites de trabalho em Portugal os Eng^{os} Peter Surovy e Diana por todo o carinho e amizade.

A querida amiga e estagiária, Quirina Isabel Monteiro, acadêmica de Engenharia Agrícola da Universidade de Évora, por todo carinho, amizade e atenção na execução dos trabalhos durante o estagio e Doutoramento.

Aos Funcionários dos laboratórios de Física dos Solos e Engenharia Agrícola da Universidade de Évora, em especial aos Srs. Manoel Junca e Custódio, a Engenheira Helena Mafalda e as Sra. Elizeta e Maria das Dores, e a querida amiga Beatriz por toda a atenção, auxílio e a alegria durante a execução dos trabalhos de campo e laboratório.

Ao professor Marcos Bacis Ceddia, pela sua valiosa amizade e respeito, e grandiosa contribuição com sugestões prestadas durante a análise geoestatística deste trabalho.

Aos meus amigos e estagiários, que foram inseparáveis durante as fases de experimentação no campo e no laboratório, Salim Jacauna (Inhamundá), Juliano

Stafanato, Leonardo M. Pimenta, Roberto Trindade, Fellippo Povill, Antônio Viana, Fábio Etcheverria, Fernanda Correia.

Aos amigos e companheiros da pós graduação de todas as horas: Robert Macedo, Ricardo Tarré, Diego Mureb, David, Alex Resende, Elvino, Otávio Oliveira, Polidoro, Jerri, Perin, Ricardo, Geovane, Fabiana, Marivânia Brasil, Fabiano Balieiro, e todos aqueles que por acaso eu tenha esquecido.

Ao Índio Pena Branca, que sempre na prática do bem esteve me auxiliando, com suas mensagens de esperança, de amor e de carinho.

Aos funcionários técnicos administrativos e de apoio do Dep. Solos (UFRRJ), pela amizade e trabalho.

Aos funcionários e técnicos administrativos da Universidade de Évora e em especial a todos da da Herdade da Mitra, pela amizade e valiosa contribuição, além do excelente convívio durante este ano que por lá passei.

Ao funcionário Pedro Alves (Pedrão), pela sua dedicação e carinho durante estes anos de convivência.

Ao CNPq e a CAPES, pelas bolsas de estudo no Brasil e no Exterior.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

E a todos aqueles que por ventura tenha esquecido, peço perdão.

MEUS SINCEROS AGRADECIMENTOS!

BIOGRAFIA

Felipe da Costa Brasil nasceu na cidade do Rio de Janeiro em 11 de março de 1975. Durante parte de sua infância e adolescência residiu em Casimiro de Abreu -RJ, dando início às suas atividades rurais aos 11 anos junto com seu pai, na fazenda Santa Maria. Em 1992 diplomou-se Técnico em Agropecuária pela Escola Estadual Agrícola Antônio Sarlo. Ingressando na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro em 1993, diplomou-se em Engenharia Agrônoma em 1997. Durante a graduação foi bolsista de Iniciação Científica pela EMBRAPA Agrobiologia sob a orientação do Dr. Sebastião Manhães Souto. Ocupou o cargo de Presidente do CEA (Centro de Estudos Agrônomicos) de 1995 a 1996. De janeiro de 1998 a fevereiro de 1999 desenvolveu atividades de bolsista de aperfeiçoamento no laboratório de Ecofisiologia de Plantas Cultivadas, sob a orientação do professor Roberto O. P. Rossiello. Em março de 1999 ingressou no Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo (UFRRJ), sob a mesma orientação, concluindo seu Mestrado em fevereiro de 2001. Em março deste mesmo ano nesta mesma Instituição e sob a mesma orientação, iniciou suas atividades de Doutorado, realizando parte do trabalho sob a orientação do Pesquisador do IAC, Dr. Sidney Rosa Vieira. Em setembro de 2003 foi contemplado com uma bolsa de Doutorado no Exterior da CAPES, realizado na Universidade de Évora em Portugal sob a co-orientação da Dra. Maria do Rosário Oliveira, defendendo sua tese de Doutorado no dia 21 fevereiro de 2005.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1	Introdução	Erro! Indicador não definido.
2.2	Os Estudos do Sistema Radicular e o Ecossistema Pastoril	4
2.3	O Sistema Radicular e o Condicionante Edáfico	5
2.4	Os Métodos de Estudo de Raízes	10
3.	CAPÍTULO I EFEITOS DA QUEIMA E DO CORTE MECÂNICO DA PASTAGEM SOBRE AS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DO SISTEMA RADICULAR DE <i>Brachiaria humidicola</i> : UM ESTUDO A PARTIR DO MÉTODO DA TRINCHEIRA	14
3.1	INTRODUÇÃO	17
3.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3.2.1	Localização	18
3.2.2	Clima.....	18
3.2.3	Solo	19
3.2.4	Pastagem.....	20
3.2.5	Simulação dos tratamentos	20
3.2.6	Amostragem.....	20
3.2.7	Preparação das raízes	21
3.2.8	3.2.8. Quantificação das raízes por processamento digital de imagens	22
3.2.9	Duração dos procedimentos.....	22
3.2.10	Delineamento estatístico.....	23
3.2.11	Apresentação dos dados	24
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
3.3.1	Variabilidade da densidade radicular.....	25
3.3.2	Densidade do comprimento radicular total.....	27
3.3.3	Densidade do comprimento radicular por classe de diâmetro	32
3.3.4	Densidade da massa seca radicular total.....	42
3.3.5	Densidade da massa seca radicular por classe de diâmetro	47
3.3.6	Comprimento radicular específico.....	53
3.4	CONCLUSÕES	58
4.	CAPÍTULO II INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE REPETIÇÕES E DE CLASSES DE DIÂMETRO NO ESTUDO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DA MASSA RADICULAR DE PASTAGEM DE <i>Brachiaria humidicola</i> : UMA APROXIMAÇÃO PARAMÉTRICA.....	59
4.1	INTRODUÇÃO	62
4.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	63
4.2.1	Localização	63
4.2.2	Método de amostragem e processamento das raízes	63
4.2.3	Análise estatística dos dados	64
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4.3.1	Número de repetições	65
4.3.2	Distribuição por classes de diâmetro	69
4.4	CONCLUSÕES	71

5.	CAPÍTULO III APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE GEOESTATÍSTICA NO ESTUDO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DE CARACTERÍSTICAS RADICULARES DE <i>Brachiaria humidicola</i>	72
5.1	INTRODUÇÃO	75
5.2	MATERIAL E MÉTODOS	77
5.2.1	Localização do estudo	77
5.2.2	Critérios de amostragem	77
5.2.3	Estatística descritiva dos dados	77
5.2.4	5.2.4. Geoestatística	77
5.2.5	Análise dos dados com referência à posição no relevo	78
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
5.3.1	Estatística descritiva dos dados	79
5.3.2	Análise do semivariograma experimental	82
5.3.3	Variabilidade com Referência ao Gradiente de Relevo	89
1.	91	
5.4	CONCLUSÕES	92
6.	CAPÍTULO IV APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DO MINIRHIZOTRON E DA ENDOSCOPIA DIGITAL, EM APOIO AO ESTUDO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DE CARACTERÍSTICAS RADICULARES DE GRAMINEAS FORRAGEIRAS.....	93
6.1	INTRODUÇÃO	96
6.2	MATERIAL E MÉTODOS	98
6.2.1	Localização do experimento.	98
6.2.2	Clima.....	98
6.2.3	Solo	99
6.2.4	Gramínea estudada.....	100
6.2.5	Implantação do experimento.....	100
6.2.6	Métodos de estudo	100
6.2.7	Processamento das amostras de solo+raiz	102
6.2.8	Análise dos resultados	102
6.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	104
6.3.1	Variabilidade dos dados de morfologia radicular.....	104
6.3.2	Imagens do minirhizotron.....	105
6.4	CONCLUSÕES	111
7.	CONCLUSÕES FINAIS	112
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
9.	ANEXO-----	

INDICE DE TABELAS

Tabela 1. Características químicas e físicas do Planossolo Háplico do campo experimental da Zootecnia na UFRRJ (Brasil, 2001).....	19
Tabela 2. Comparação da análise de variância utilizando-se o modelo completamente casualizado e o modelo hierárquico para os dados de área radicular total na profundidade de 0-0,1 m.	24
Tabela 3. Coeficientes de variação dos valores da densidade do comprimento radicular (m de raízes dm^{-3} de solo) por classe de diâmetro de uma pastagem de <i>Brachiaria humidicola</i> , na primeira época de avaliação (fevereiro).....	26
Tabela 4. Coeficiente de variação dos valores da densidade da massa radicular (m de raízes dm^{-3} de solo) por classe de diâmetro de uma pastagem de <i>Brachiaria humidicola</i> , na primeira época de avaliação (fevereiro).....	27
Tabela 5. Efeito da queima e da roçada na densidade do comprimento radicular total (m de raízes dm^{-3} de solo) de uma pastagem de <i>Brachiaria humidicola</i> , em função da época de amostragem e à profundidade de 0-0,3 m (valores médios de 4 repetições).	28
Tabela 6. Efeito da queima e da roçada na densidade do comprimento radicular total (m de raízes dm^{-3} de solo) de uma pastagem de <i>Brachiaria humidicola</i> , em função da época de amostragem e à profundidade de 0,3-0,7 m. (valores médios de 4 repetições).	29
Tabela 7. Percentual da densidade do comprimento radicular de <i>Brachiaria humidicola</i> em função da profundidade 0-0,2 m e 0,3-0,7 m no perfil de enraizamento entre épocas e tratamentos.	30
Tabela 8. Variações temporais da densidade do comprimento radicular (km de raízes m^{-2} de solo) de uma pastagem de <i>Brachiaria humidicola</i> sob três formas de manejo, por unidade de superfície do solo, à profundidade de 0-0,7m.	32
Tabela 9. Efeito da queima e da roçada na densidade do comprimento radicular (m de raízes dm^{-3} de solo) por classes de diâmetro de uma pastagem de <i>Brachiaria humidicola</i> , em função da época de amostragem e à profundidade de 0-0,1 m (valores médios de 4 repetições).....	33
Tabela 10. Efeito da queima e da roçada na densidade do comprimento radicular (m de raízes dm^{-3} de solo) por classes de diâmetro de uma pastagem de <i>Brachiaria humidicola</i> , em função da época de amostragem e à profundidade de 0,1-0,2 m (valores médios de 4 repetições).....	35
Tabela 11. Efeito da queima e da roçada na densidade do comprimento radicular (m de raízes dm^{-3} de solo) por classes de diâmetro de uma pastagem de <i>Brachiaria humidicola</i> , em função da época de amostragem e à profundidade de 0,2-0,3 m (valores médios de 4 repetições).	36
Tabela 12. Efeito da queima e da roçada na densidade do comprimento radicular (m de raízes dm^{-3} de solo) por classes de diâmetro de uma pastagem de <i>Brachiaria humidicola</i> , em função da época de amostragem e à profundidade de 0,3-0,7 m (valores médios de 4 repetições).....	37
Tabela 13. Contribuição percentual da fração raízes muito finas à densidade do comprimento radicular total de <i>Brachiaria humidicola</i> na profundidade 0,1-0,3 m.	38

Tabela 14. Contribuição percentual da fração raízes muito finas a densidade do comprimento do radicular total de <i>Brachiaria humidicola</i> na profundidade 0,3-0,7 m.....	39
Tabela 15. Percentual da fração raiz muito fina nas profundidades 0-0,3 e 0,3-0,7 m no perfil de enraizamento entre épocas e tratamentos	40
Tabela 16. Efeito da queima e da roçada na densidade da massa seca radicular total (g de raízes dm ⁻³ de solo) de uma pastagem de <i>Brachiaria humidicola</i> , em função da época de amostragem e à profundidade de 0-0,3 m (valores médios de 4 repetições)	43
Tabela 17. Efeito da queima e da roçada na densidade da massa seca radicular total (g de raízes dm ⁻³ de solo) de uma pastagem de <i>Brachiaria humidicola</i> , em função da época de amostragem e à profundidade de 0,3-0,7 m (valores médios de 4 repetições).	44
Tabela 18. Percentual da densidade da massa seca radicular de <i>Brachiaria humidicola</i> nas profundidades 0-0,3 e 0,3-0,7 m no perfil de enraizamento entre épocas e tratamentos.....	45
Tabela 19. Variações temporais da densidade da massa seca radicular (kg m ⁻² de solo) de uma Pastagem de <i>Brachiaria humidicola</i> sob três formas de manejo (valores referentes a profundidade 0,7m).	47
Tabela 20. Efeito da queima e da roçada na densidade da massa seca radicular total (g de raízes dm ⁻³ de solo) por classe de diâmetro de uma pastagem de <i>Brachiaria humidicola</i> , em função da época de amostragem e à profundidade de 0-0,1 m (valores médios de 4 repetições).	48
Tabela 21. Contribuição percentual das diferentes classes de diâmetro a densidade massa seca radicular total (g de raízes dm ⁻³ de solo) em função da época de amostragem e do tratamento, à profundidade de 0-0,1m.	50
Tabela 22. Efeito da queima e da roçada na densidade da massa seca de raízes muito finas (g de raízes dm ⁻³ de solo) de uma pastagem de <i>Brachiaria humidicola</i> , em função da época de amostragem e à profundidade de 0,1-0,2 m (valores médios de 4 repetições).	50
Tabela 23. Efeito da queima e da roçada na densidade da massa seca radicular (g de raízes dm ⁻³ de solo) por classe de diâmetro, de uma pastagem de <i>Brachiaria humidicola</i> , em função da época de amostragem e à profundidade de 0,2-0,3 m (valores médios de 4 repetições).....	51
Tabela 24. Efeito da queima e da roçada na densidade da massa seca de raízes muito finas (g de raízes dm ⁻³ de solo) de uma pastagem de <i>Brachiaria humidicola</i> , em função da época de amostragem e à profundidade de 0,3-0,7 m (valores médios de 4 repetições).	52
Tabela 25. Contribuição percentual das raízes muito finas a densidade massa seca radicular total (g de raízes dm ⁻³ de solo) em função da época de amostragem e do tratamento, à profundidade de 0,3-0,7 m.	53
Tabela 26. Variações temporais do comprimento radicular específico (m g ⁻¹ de raízes) de uma pastagem de <i>Brachiaria humidicola</i> sob três formas de manejo (valores referentes as profundidades 0-0,3 m).	54
Tabela 27. Variações temporais do comprimento radicular específico (m g ⁻¹ de raízes) de uma Pastagem de <i>Brachiaria humidicola</i> sob três formas de manejo (valores referentes as profundidades 0,3- 0,7 m).	56
Tabela 28. Variações temporais do comprimento radicular específico (m g ⁻¹ de raízes) de uma Pastagem de <i>Brachiaria humidicola</i> sob três formas de manejo (valores referentes a profundidade 0-0,7m).	57

Tabela 29. Classes para a caracterização da distribuição percentual da morfologia radicular por diâmetro.	63
Tabela 30. Média, desvio padrão, variância e coeficiente de variação (CV) da massa seca radicular de <i>Brachiaria humidicola</i> , determinados com diferentes números de repetições coletadas com anel volumétrico, em duas profundidades do solo.	66
Tabela 31. Distribuição percentual da massa seca radicular de <i>Brachiaria humidicola</i> , classificada por cinco classes de diâmetro (médias de 128 repetições).	70
Tabela 32. Estatística descritiva dos dados de densidade da massa seca radicular (DMSR) (g anel ¹) de uma pastagem de <i>Brachiaria humidicola</i> em três épocas e duas profundidades de amostragem (valores médios de 100 repetições).	80
Tabela 33. Dados do modelo teórico esférico, efeito pepita (C ₀), componente estrutural (C ₁), alcance (a), coeficiente de determinação, soma do quadrado dos desvios e contribuição percentual de C ₀ para a construção dos semivariogramas da densidade da massa seca radicular de <i>Brachiaria humidicola</i>	83
Tabela 34. Comparação dos valores de Patamar e variância total dos dados estudados por época e profundidade de amostragem.	83
Tabela 35. Valores de coeficiente de variação por profundidade e por ponto de referência no relevo nas diferentes épocas de amostragem.	91
Tabela 36. Normais climatológicas da Região do Alentejo no Sul de Portugal Estação Experimental de Évora currais (Ano Agrícola 2003-2004).	99
Tabela 37. Valores médios e percentuais de densidade do comprimento (DCR; m dm ⁻³) e da massa seca radicular (DMR; g dm ⁻³), e os coeficientes de variação em função da profundidade de amostragem (média de 6 repetições).	104

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista parcial do local do experimento e da pastagem de <i>Brachiaria humidicola</i> . UFRRJ, Instituto de Zootecnia, Setor de Caprinocultura. Seropédica, RJ.	18
Figura 2. Valores diários de precipitação e temperatura máxima e mínima durante o período de realização do estudo (agosto de 1999 a outubro de 2000).	19
Figura 3. Estratégia para a amostragem vertical dos volumes de solo+raiz através do monolito metálico.	21
Figura 4. Distribuição vertical da densidade do comprimento radicular total (m dm^{-3}) na 1ª época de amostragem (fevereiro). (valores médios de 4 repetições).	31
Figura 5. Distribuição vertical da densidade do comprimento radicular total (m dm^{-3}) na 4ª época de amostragem (agosto). (valores médios de 4 repetições).	31
Figura 6. Distribuição vertical da densidade do comprimento radicular (m dm^{-3}) por diferentes classes de diâmetro (1ª coleta em fevereiro, área roçada).	41
Figura 7. Distribuição vertical da densidade do comprimento radicular (m dm^{-3}) por diferentes classes de diâmetro (4ª coleta em agosto, área roçada).	41
Figura 8. Distribuição vertical da DCR (m dm^{-3}) por diferentes classes de diâmetro (4ª coleta em fevereiro, área queimada). (valores médios de 4 repetições).	42
Figura 9. Distribuição vertical da DCR (m dm^{-3}) por diferentes classes de diâmetro (4ª coleta em Agosto, tratamento Queimada). (valores médios de 4 repetições).	42
Figura 10. Distribuição vertical da densidade da massa seca radicular (g dm^{-3}) do total das classes na 1ª época de amostragem (fevereiro) na camada de 0-0,7 m. (valores médios de 4 repetições).	46
Figura 11. Distribuição vertical da densidade da massa seca radicular (g dm^{-3}) do total das classes na 4ª época de amostragem (agosto) na camada de 0-0,7 m. (valores médios de 4 repetições).	46
Figura 12. Diferença percentual entre médias da massa seca radicular de <i>Brachiaria humidicola</i> na profundidade 0-0,1 m, em função do número de repetições a um dado coeficiente de variação (38,15 %, obtido com 128 repetições).	67
Figura 13. Diferença percentual entre médias da massa seca radicular de <i>Brachiaria humidicola</i> na profundidade 0,1-0,2 m, em função do número de repetições a um dado coeficiente de variação (40 %, obtido com 128 repetições).	68
Figura 14. Representação gráfica do semivariograma.	76
Figura 15. Freqüência relativa dos valores da densidade de massa seca radicular da profundidade 0,1-0,2 m na 1ª época de amostragem.	81
Figura 16. Freqüência relativa dos valores da densidade da massa seca radicular da profundidade 0-0,1 m na 2ª época de amostragem.	82
Figura 17. Semivariograma dos valores da densidade da massa seca radicular da profundidade 0,1-0,2 m na 1ª época de amostragem.	85
Figura 18. Semivariogramas direcionais referentes à 1ª época de amostragem na profundidade 0,1-0,2m.	85
Figura 19. Semivariograma dos valores da densidade da massa seca radicular da profundidade 0-0,1 m na 2ª época de amostragem.	86
Figura 20. Semivariogramas direcionais referentes a 2ª época de amostragem na profundidade 0-0,1m.	87
Figura 21. Semivariograma escalonado dos valores da densidade da massa seca radicular na profundidade 0,1m, em todas as épocas de amostragem.	88

Figura 22. Semivariograma escalonado dos valores da densidade da massa seca radicular na profundidade 0,1-0,2 m, em todas as épocas de amostragem.	88
Figura 23. Variação da massa seca radicular de <i>Brachiaria humidicola</i> em função do relevo no mês de Setembro de 2001, na profundidade 0-0,1m.	89
Figura 24. Variação da massa seca radicular de <i>Brachiaria humidicola</i> em função do relevo no mês de novembro de 2001, na profundidade 0-0,1m.	90
Figura 25. Variação da massa seca radicular de <i>Brachiaria humidicola</i> em função do relevo no mês de Janeiro 2002, na profundidade 0-0,1m.	90
Figura 26A) Aspectos visuais do perfil do solo mediterrânico na caracterização do Perfil cultural (período seco). B) Detalhe das rachaduras e formação de estruturas devido às propriedades vérticas do solo, total ausência de raízes vivas no horizonte sub-superficial.	100
Figura 27. Detalhe do amostrador volumétrico pneumático para coleta de amostras de solo+raiz (monolito).	101
Figura 28. Detalhe do computador portátil (Sony VAIO, running Windows 98) ligado à sonda do endoscópio no momento do registro de uma imagem no campo experimental (março de 2004).	102
Figura 29. Distribuição vertical da densidade radicular do comprimento (m dm^{-3}) do azevém anual (valores médios de 6 repetições).	105
Figura 30. Distribuição vertical da densidade radicular da massa seca (g dm^{-3}) do azevém anual (valores médios de 6 repetições).	105
Figura 31. Germinação do <i>Lolium multiflorum</i> na camada superficial ($\pm 2\text{cm}$). (18 mm(H) x 13,5 mm (V)), imagem obtida aos 30 dias após o plantio.	106
Figura 32. Destaque a anisotropia das raízes, a presença de água ($\pm 0.1\text{m}$ de profundidade em 23 de dezembro de 2003).	107
Figura 33. A) Raízes com um bom acondicionamento do crescimento na interface solo-tubo. B). Destaque para alterações por efeito de compactação do solo.	107
Figura 34. Horizonte compactado e alteração (curvatura) das raízes, com destaque para a alteração do diâmetro das raízes.	108
Figura 35. Crescimento da região de alongação das raízes, destaque para o crescimento em diferentes direções (anisotropia).	108
Figura 36. Seqüência de quatro imagens ao longo do 1 tubo, destacando um cluster de pêlos radiculares em um poro. (Profundidade no Solo 0,35-0,39 m).	109
Figura 37. Crescimento das raízes na profundidade 0,22 m, destaque para a presença de minerais primários.	110
Figura 38. Tela principal do software Root Tracker 2.0 © (Duke University, 2003), para execução da medição do diâmetro do eixo radicular.	110

RESUMO GERAL

BRASIL, Felipe da Costa. **Variabilidade espacial e temporal em características morfológicas de sistemas radiculares de gramíneas forrageiras**. Seropédica: UFRRJ, 2005. 137p. (Tese de Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo).

O objetivo deste trabalho foi estudar a variabilidade espacial e temporal da morfologia radicular de gramíneas forrageiras, através de métodos de quantificação destrutivos e análise digital de imagens, associados a ferramentas da estatística clássica e da geoestatística. Foram implantados três experimentos em pastagem de *Brachiaria humidicola* em um Planossolo no Instituto de Zootecnia da UFRRJ. Adicionalmente, foi realizado um experimento com uma forrageira de inverno em Portugal, objetivando avaliar o potencial do “minirhizotron” em conjunto com a endoscopia digital, como método complementar aos destrutivos no estudo da variabilidade espacial de raízes de gramíneas forrageiras. Inicialmente foi realizado um estudo sobre os efeitos de três métodos de manejo sobre a dinâmica espacial e temporal das raízes, através da queima e do corte mecânico da pastagem. As raízes muito finas (diâmetro inferior a 0,8 mm) contribuíram com mais de 80% do comprimento e 70% da massa radicular total, porém esta contribuição reduziu-se à maior profundidade, notadamente no tratamento roçado e na testemunha, enquanto que na queimada foi observado um acréscimo significativo do comprimento e da massa radicular a partir dos 0,3 m de profundidade no período seco. O comprimento radicular específico da área queimada, durante o período seco, apresentou um aumento médio de 5 m g^{-1} em comparação com os demais tratamentos. Isto sugere que a queimada estimulou a expansão radicular, para a captação de água e nutrientes no período seco. Em seguida foi realizado um estudo sobre a influência do número de repetições e de diferentes classes de diâmetro na determinação da massa radicular da mesma pastagem. As raízes mantiveram o padrão de variabilidade espacial independente do número de repetições, pois o coeficiente de variação não reduziu-se com o aumento de 4 para 128 repetições, estabilizando-se em torno de 38 e 40%. O modelo estatístico proposto indicou serem necessárias 32 repetições, para identificar diferenças de 20% entre médias de 2 tratamentos. As raízes finas contribuíram com mais de 60% da massa radicular total. No terceiro experimento foram aplicadas técnicas de geoestatística para descrever os padrões da variabilidade espacial e temporal das raízes. Foi identificada dependência espacial de fraca a moderada, para a massa de raízes, rejeitando-se a hipótese de distribuição aleatória do sistema radicular sugerida pela estatística paramétrica. O modelo esférico apresentou o melhor ajuste aos semivariogramas experimentais, porém, os valores do efeito pepita foram altos em todas as épocas e profundidades amostradas. O modelo detectou um valor de alcance médio de 27 m para o gride estudado, e um comportamento anisotrópico na distribuição do sistema radicular em função das diferentes coordenadas estudadas pelo semivariograma direcional. No quarto experimento, foram utilizados dois métodos de estudo para a avaliação de raízes do *Lolium multiflorum*. A distribuição vertical da densidade radicular do azevém ajustou-se a uma função exponencial decrescente de forma semelhante à gramínea tropical. A endoscopia digital acoplada ao minirhizotron revelou inúmeras informações sobre o crescimento radicular em interação com o ambiente edáfico *in situ*, complementando as informações obtidas pelo método destrutivo.

Palavras chave: raízes, geoestatística, minirhizotron, *Brachiaria humidicola* e *Lolium multiflorum*.

GENERAL ABSTRACT

BRASIL, Felipe da Costa. **Spatial and temporal variability of morphological characteristics of forage grass root systems**. Seropédica: UFRRJ, 2005. 137p. (Thesis, Doctor in Agronomy, Soil Science).

This study had as objective to study spatial and temporal variability of morphological traits of forage grass root systems, through destructive quantification methods and digital image analysis, associated to tools of the classical statistics and geostatistic. Three experiments were installed in a *Brachiaria humidicola* pasture cultivated for approximately 20 years, in a Planossolo Háplico (Fragiudult) at the Animal Science Institute of UFRRJ. Additionally, an experiment was carried out in a winter grass in the South of Portugal, to evaluate the potential of the “minirhizotron” joined with digital endoscopy, as complementary methods of destructive methods, to study the spatial variability of root forage grass. Initially, a study was accomplished on the effects of three management practices on spatial and temporal dynamics of forage roots, after burning and mechanical cutting of the pasture. The very fine roots (diameter smaller than 0.8 mm) contributed with more than 80% of the total root length. However, this contribution was reduced as soil depth increased, namely in the control and cutting treatments, while the burnt area had a significant increment of the root length and mass after the 0.3 m depth, in the dry season. Specific root length from the burnt area showed an average increase of 5 m g⁻¹ as compared with the other treatments during the dry period. This suggests that modifications promoted by surface fire stimulated the root expansion, as a possible strategy for water and nutrients absorption in the dry period. In the sequence a study was accomplished on the influence of increasing the number of replications and of different diameter classes in root mass determination, in an area with the same grass. Roots maintained the same pattern of spatial variability, despite number of replications, since variation coefficient was not reduced as the number of replicates increased from 4 to 128, and it stabilized around the CV% 38 and 40%. The proposed statistical model indicated that 32 replicates were necessary to detect differences of 20% between averages of the two treatments. The very fine roots contributed with more than 60% of the total root mass. The third experiment was accomplished with application of geostatistic techniques, and the objective was to describe roots spatial and temporal variability patterns, in three sampling times. There was spatial dependence, varying from weak to moderate, in root mass distribution as a function of distance, that resulted in rejection of the root system random distribution hypothesis, as suggested by parametric statistics. The spherical model showed the best adjustment to the experimental semivariograms. However, values of the nugget effect were high for all sampling times and depths. The model detected a medium range value of 27m for the studied grid, and an anisotropic behavior of the root system distribution as a function of different coordinates studied by the directional semivariogram. In the fourth experiment, two methods of study were used to evaluate root systems of *Lolium multiflorum*. Root density distribution along soil profile of ryegrass was adjusted to a decrescent exponential model, similarly to tropical grass. Digital endoscopy coupled with minirhizotron revealed information about anisotropic pattern of root growth when interacting with edaphic environment *in situ*. It complemented information obtained by the destructive method.

Key words: Root sampling, anisotropy, geostatistic, minirhizotron, *Brachiária humidicola* e *Lolium multiflorum*.

1. INTRODUÇÃO GERAL

As pastagens do Brasil ocupam um lugar de destaque no cenário mundial, por sustentarem o maior rebanho comercial de bovinos do mundo, aproximadamente 164 milhões de cabeças. Estas pastagens, após alguns anos de uso freqüente, sofrem um declínio de produtividade (Macedo, 1995), causando sérios prejuízos econômicos e sociais nas regiões dependentes da pecuária leiteira e de corte. Estimativas indicam que 50% dos pastos estabelecidos nas principais regiões pastoris do Brasil estão degradados ou em processo de degradação (de Faria et al., 1997). Diversas causas concorrem para o progressivo declínio da produtividade das pastagens (Boddey et al., 1993), e como a decomposição das raízes e a deposição da serrapilheira são as principais vias de ingresso da matéria orgânica no solo, deve existir uma conexão clara entre o processo degradativo do sistema solo-planta e a quantidade de carbono orgânico e nitrogênio que anualmente são reciclados via sistema radicular.

Fisher et al. (1994) observaram, em solos da Colômbia, que pastagens de *Brachiaria* spp., em monocultura, podem acumular anualmente grande quantidade de carbono em profundidade. Urquiaga et al. (1998) observaram que, a despeito dessa grande adição anual de resíduos radiculares ao solo, a produtividade das pastagens declina após alguns anos. Esses autores sugeriram que tal situação pode resultar de uma ciclagem muito lenta de uma grande fração da massa radicular, conduzindo à conservação ou acumulação de carbono no solo, mas em contrapartida, aumentando a imobilização do N mineral, e por essa via, reduzindo drasticamente a disponibilidade de N para as plantas. Embora esta hipótese seja bem plausível para explicar parte do paradoxo representado pelo aparente alto acúmulo de carbono nas raízes das gramíneas forrageiras tropicais e o rápido declínio de sua produtividade, a sua validação demanda estudos quantitativos sobre a dinâmica do sistema radicular “in situ” (Urquiaga et al., 1998), já que tais estudos, são muito escassos no país e no exterior.

De fato, estima-se que menos de 10 % dos estudos mundiais sobre pastagens, tenham feito medições diretas da produção da biomassa subterrânea (Scurlock & Hall, 1998). Mais raros são ainda os que têm quantificado as influências, diretas ou indiretas, das características morfológicas, anatômicas e fenológicas do sistema radicular sobre processos significativos à estabilidade do ecossistema pastoril. As razões para esta carência de dados sobre os vários aspectos do crescimento e da demografia dos sistemas radiculares, que não é exclusiva das espécies forrageiras, são historicamente explicáveis pelas dificuldades metodológicas (Van Noordwijk & Gein, 1996; Vogt et al., 1998), a própria inacessibilidade do sistema radicular como objeto de experimentação, sua complexidade tridimensional e sua marcada variabilidade espacial e temporal (Böhm, 1979; Van Noordwijk, 1993). Além disso, uma descrição completa da dinâmica do enraizamento deve considerar as variações temporais na extensão vertical e horizontal do sistema radicular (Fisher & Dunham, 1984). Como a densidade radicular é altamente responsiva a flutuações do ambiente edáfico e às propriedades físico-químicas do solo, configura-se um quadro que justifica a escassez de estudos in situ, sob condições naturais. Como não podemos planejar e manejar aquilo que de fato não conhecemos, estudar a variabilidade espaço-temporal das raízes deve tornar-se a primeira etapa para os estudos de amostragem e quantificação do sistema radicular.

Tanto os estudos sobre os padrões de variabilidade espacial de raízes no campo como aqueles dedicados especificamente a problemas amostrais, têm sugerido a utilização de ferramentas de geoestatística como complemento às fornecidas pela

estatística tradicional, admitindo-se a presença de dependência espacial entre as amostras, devido a influências edafoclimáticas, de práticas de manejo e da própria natureza anisotrópica do crescimento radicular (Bengough et al., 2000; Plant, 2001).

A maior parte dos métodos de estudo baseia-se no princípio de separação e lavagem das raízes do solo, e, portanto são de natureza destrutiva, tanto para o sistema radicular, como para o ambiente em estudo (Nepstad et al., 1994; Fisher et al., 1994).

Com o advento da moderna tecnologia digital, parte do esforço envolvido na quantificação de características radiculares tem sido consideravelmente amenizado, com a introdução de softwares de análise de imagens, que além de automatizar o processo antes realizado manualmente, possibilitam extrair novas informações morfológicas (Dowdy et al., 1998; Ritchner et al., 2000). Estudos utilizando métodos de extração de volumes fixos de solo, acoplados às técnicas de análise digital, têm sido utilizados de forma alternativa e precisa na quantificação da morfologia radicular (Brasil et al., 2002).

Também, o método do minirizotron acoplado a vídeo câmeras, assim com as tecnologias digitais, têm sido apontado como um grande avanço nos estudos de dinâmica de raízes finas em condições naturais (Hendrick & Pregitzer, 1992; Campbell et al., 1994; Fitter et al., 1996; Price & Hendrick, 1998). Este método consiste na obtenção de imagens de raízes que se distribuem na interface de um tubo transparente colocado verticalmente ao perfil de enraizamento, com auxílio de uma câmera de vídeo em diferentes profundidades, permitindo registrar de forma não destrutiva, parâmetros morfológicos como comprimento, área e diâmetro, além de parâmetros qualitativos como a cor das raízes “in situ” (Ferguson & Smucker, 1989; Price & Hendrick, 1998).

No entanto, não obstante aos avanços desta tecnologia, poucas são as pesquisas utilizando o minirizotron em estudos da variabilidade espacial e temporal do sistema radicular de pastagens, sobretudo em ecossistemas tropicais, o que pode estar associado à relativa inacessibilidade ao equipamento, além da carência de estudos para a calibração e comparação com os diferentes métodos diretos e indiretos de amostragem.

Este trabalho objetivou estudar o padrão de variabilidade espacial e temporal de características morfológicas do sistema radicular de *Brachiaria humidicola*. Adicionalmente, também objetivou, estudar o método do minirizotron acoplado à endoscopia digital, como ferramenta complementar para os estudos de variabilidade do sistema radicular de gramíneas forrageiras.

Especificamente, são objetivos desta tese:

- a) Estudar através do método da trincheira associada à extração seqüencial de volumes fixos de solo+raiz e o processamento digital de imagens, os efeitos sazonais e de práticas de renovação das pastagens sobre o padrão de variabilidade espaço-temporal da morfologia radicular de *Brachiaria humidicola*.
- b) Avaliar a variabilidade amostral relativa ao número de repetições em estudos do sistema radicular da *Brachiaria humidicola*.
- c) Aplicar as ferramentas da geoestatística nos estudos de variabilidade espacial da densidade radicular de *Brachiaria humidicola* em um Planossolo Háplico.
- d) Aplicar as ferramentas do minirizotron e da tecnologia da endoscopia digital, como método auxiliar aos métodos destrutivos nos estudos sobre variabilidade espacial do sistema radicular de gramíneas forrageiras.

2. REVISÃO DE LITERATURA

As pastagens representam um lugar de destaque no atual panorama agropecuário mundial, ocupando a maior parte da superfície dedicada a alimentação dos animais selvagens e domésticos. No entanto, muitos ainda são os problemas relacionados com a queda de produtividade e a sua degradação, principalmente no que tange a sustentabilidade e sazonalidade das culturas forrageiras (Brasil et al., 2004).

Os estudos sobre a produtividade da fitomassa aérea das pastagens, bem como o de propriedades físico-hídricas e químicas do solo, têm sido enfatizados em inúmeras pesquisas em todo mundo. Entretanto, pouca importância tem sido dada, nos estudos mundiais sobre pastagens e forragens, à dinâmica radicular e seus efeitos sobre a produtividade das pastagens. O sistema radicular das espécies forrageiras é, seguramente, o compartimento menos estudado do ecossistema pastoril (Scurlock & Hall, 1998). Cecato et al. (2004) ainda consideram as raízes como sendo o “componente esquecido das pastagens”, embora esta afirmação tenha sido feita por Davidson (1978) a 27 anos atrás. Muito pouco ainda se conhece dos efeitos das práticas de manejo da parte aérea das pastagens sobre a dinâmica do sistema radicular, não obstante o interesse da comunidade científica, dos técnicos e produtores de todo mundo (Smit et al., 2000).

Esta preocupação com relação à escassez de dados sobre o sistema radicular está diretamente relacionada ao interesse da pesquisa, em entender as mudanças na produtividade da parte aérea forrageira (Corsi et al., 2000). Como exemplo, as alterações na dinâmica do crescimento vegetal, afetando a distribuição vertical e temporal das densidades em massa, área e comprimento radicular (Kg , m^2 e m m^{-3} de solo ou ha^{-1}), ao longo do perfil do solo e das estações de crescimento (Corsi et al., 2000; Brasil, 2001).

Estas alterações nas características das raízes são afetadas por diversos fatores edafoclimáticos, e principalmente pelos efeitos diretos do manejo da pastagem, e desta forma, devemos determinar o sistema de pastejo e a capacidade de suporte da pastagem de forma a evitar a degradação por efeito de “sub ou superpastejo” (Rodrigues & Cadima-Zevallos, 1991; Corsi et al., 2000).

Diversos autores tendem a utilizar de forma simplificada e menos trabalhosa para calcular a quantidade total de raízes, a relação “raiz: parte aérea”, assumindo que a taxa de produção de massa seca é similar para as raízes como para a parte aérea. Porém, estas estimativas em muitos casos são inválidas, principalmente porque podem ocorrer grandes variações espaciais e temporais nas raízes que não são refletidas na parte aérea (Hooker et al., 2000).

O principal entrave para a realização destas avaliações ainda é de tipo metodológico (Smit, 2000; Brasil, 2001). Tal situação é explicável pela relativa inacessibilidade das raízes como objetos de estudo e experimentação, sua complexidade tridimensional e sua marcada variabilidade espacial e temporal (Böhm, 1979; Van Noordwijk, 1993). Com efeito, as raízes crescem naturalmente dentro do volume poroso do solo, distribuindo-se nesse volume segundo direções não uniformes (anisotropia), ditadas pelos tropismos de cada tipo de raízes (ex. ortogeotropismo em eixos primários), e pelos padrões endógenos de ramificação (Bengough et al., 2000). Portanto, os sistemas radiculares são estruturas ramificadas complexas que variam no espaço e no tempo (Bengough et al., 2000), e isto tem implicações diretas nos aspectos metodológicos dos estudos. Por outro lado, o solo possui seus próprios padrões de variabilidade espacial, expressos em gradientes diferenciados de propriedades físicas e

químicas, que superpostos à variabilidade endógena das raízes, reforçam a anisotropia do sistema radicular (Bengough et al., 2000).

Neste contexto, verifica-se a importância em se aprofundar os estudos relativos à complexa interface solo-raiz-parte aérea, com o objetivo de gerar informações que possam auxiliar no entendimento dos efeitos do pastejo, ou da desfolha vegetal pelos animais, além dos impactos pelo pisoteio, sobre a dinâmica radicular e sua interação com a manutenção da produtividade das pastagens.

Para isto, torna-se necessário à viabilização de métodos que facilitem e tornem mais rápido o processo de obtenção de dados a cerca das raízes, já que os da parte aérea são mais acessíveis.

2.1 Os Estudos do Sistema Radicular e o Ecossistema Pastoril

A pecuária brasileira alcançou a posição de maior exportadora de carne do mundo no ano de 2003, possibilitado por um rebanho comercial bovino de 164 milhões de cabeças. A maior parte dos 180 milhões de hectares de pastagens, que suportam o rebanho nacional, é de monocultura de gramíneas. Geralmente, com o passar do tempo, as áreas destinadas às pastagens começam a entrar em declínio de produtividade, permitindo a invasão de plantas invasoras de baixa palatabilidade e digestibilidade (Boddey et al., 1993; de Faria et al., 1997; Oliveira 2000). Este processo de degradação das pastagens, associado à estacionalidade das forrageiras em função dos períodos sazonais de produção, prejudica severamente a produção animal, e compromete a fertilidade e a integridade dos solos a longo prazo, principalmente nas áreas destinadas à exploração extensiva (Macedo, 1995).

Como normalmente não são adotadas práticas freqüentes e regulares de adubação de manutenção na maior parte das áreas destinadas às pastagens cultivadas e naturais, a ciclagem de nutrientes no sistema assume grande importância na manutenção da fertilidade do solo (Boddey et al., 1993). Neste processo, as principais vias de entrada de nutrientes no sistema se dão através da decomposição de serrapilheira e na ciclagem das raízes senescentes, principalmente as raízes finas, sendo ainda de suma importância para a sustentabilidade dos ecossistemas pastoris, as várias associações entre as raízes das forrageiras com microorganismos (bactérias fixadoras de N₂ e associações micorrízicas) (Boddey & Victoria, 1986; Tisdall, 1996; Howeler et al., 1987; Boddey et al., 1996; Siqueira & Moreira, 1997).

Os estudos sobre a produção de fitomassa vegetal da parte aérea, bem como o da matéria orgânica e de carbono do solo, têm sido enfatizados em muitas pesquisas. Entretanto, pouca importância tem sido dada ao carbono e demais nutrientes armazenados nas raízes de pastagens tropicais (Fisher et al., 1994), que podem ser profundas e abundantes (Woomer et al., 1994; Manley et al., 1995; Fisher et al., 1994; Nepstad et al., 1994; Goedert et al., 1985).

Apesar das pastagens estarem condicionadas à produção de parte aérea e sua máxima utilização em função da rebrota por unidade de área, também exercem uma importante função seqüestrando quantidades significantes de carbono nas camadas mais profundas do solo. A quantidade de carbono “seqüestrado” pelas gramíneas forrageiras tropicais pode resultar em até 27% a mais de carbono no solo na camada 0-100 cm comparado com a savana nativa (Fisher et al., 1994). Diversos estudos conduzidos na bacia Amazônica têm demonstrado que, na década subsequente ao corte da floresta e introdução de pastagens, o teor de carbono das camadas superiores do solo quase sempre aumenta em relação ao da floresta original (Bonde et al., 1992; Cerri & Moraes, 1992; Cerri et al., 1992; Choné et al., 1991)

A quantidade total de raízes em áreas de pastagens varia em função da fertilidade e da profundidade do solo em análise. Plantas forrageiras com deficiência de nitrogênio e relação parte aérea:raiz de 0,81 na camada 0-100 cm podem ter a relação alterada para 1,85 quando adubadas com nitrogênio (Bushby et al., 1992). Valores semelhantes (0,82) foram obtidos em *Brachiaria decumbens* nas savanas colombianas (Ayarza et al., 1994). Nos Cerrados brasileiros, onde os solos são profundos e a ocorrência de veranicos é freqüente, a distribuição de raízes geralmente supera a profundidade de 100 cm, sendo observada uma abundância de raízes até os 40 cm (Rocha Filho et al., 1996; Oliveira, 2000).

Embora em estudos de raízes no campo, a característica de maior enfoque seja a massa radicular (fitomassa de raízes), o comprimento radicular (definido pelo somatório do comprimento de todos os eixos radiculares), tem sido a característica mais utilizada como base de cálculo para inúmeras funções de determinação de variações temporais do sistema radicular, sendo considerado como característica padrão para a determinação da densidade (m de raiz m³ de solo) e do crescimento radicular (Van Noordwijk, 1993). Tal característica é um indicador do potencial de absorção de água e nutrientes, sendo proporcionalmente maior o volume ocupado e explorado do solo, quanto maior for o comprimento radicular total (Atkinson, 2000).

2.2 O Sistema Radicular e o Condicionante Edáfico

A distribuição do sistema radicular no solo é resultado do potencial genético que a planta possui para o desenvolvimento de suas raízes (alocando uma parte de sua produção em carboidratos para o sistema radicular) e da interação deste organismo, com os fatores ambientais edafoclimáticos (Van Noordwijk, 1987). Tal processo é governado pela pressão radicular gerada por mecanismos biofísicos do crescimento vegetal (pressão de crescimento radicular, axial e radial), em oposição à impedância mecânica ou resistência à penetração do solo, causada pelas forças que existem entre sólidos, as barreiras químicas e a solução do solo (Libardi & van Lier, 1999)

O crescimento radicular ocorre quando células da região meristemática (coifa) se dividem, alongam-se e levam a ponta da raiz através do material adjacente. A pressão de turgor nas células que se alongam é a força direcional, e deve ser suficiente para sobrepor a resistência da parede celular ou as demais resistências externas do meio. Assim, a pressão de turgor celular e a resistência da parede celular, somada a resistência do meio à deformação, são fatores importantes para avaliação do crescimento radicular através do solo (Camargo & Alleoni, 1997 citados por Rezende, 2000).

Os fatores externos que influenciam a fisiologia das raízes e, por conseqüência, seu crescimento e o desenvolvimento das culturas, podem ser classificados, quanto à sua natureza, em químicos (pH, a concentração de elementos tóxicos e nutrientes), físicos e físico-hídricos (oxigenação, temperatura, umidade, textura, densidade/porosidade) e biológicos (atividade microbiana, patogênica, entre outros). Quase todos estes fatores são interdependentes, tomando-se como exemplos, a influência da temperatura e do pH na atividade microbiana (decompositores, FBN e micorrizas), a oxigenação interagindo com os fatores químicos e biológicos (oxidação, respiração, etc.), e a influência da umidade do solo com relação à resistência a penetração das raízes (Reichardt, 1981; Goedert et al., 1985; Libardi & van Lier, 1999).

De modo geral, o crescimento das plantas é reduzido drasticamente na presença de camadas compactadas, de impedimentos de natureza química (acidez e toxidez por Al³⁺) e físico-hídrica (alagamento, seca), no entanto algumas diferenças entre espécies são observadas (Taylor, 1981; Bengough & Mullins, 1990; Materechera et al., 1991). As raízes não podem alterar o diâmetro de seu ápice, para penetrar em poros menores à

sua proporção tecidual (diâmetro e área superficial). Por isto ao crescer em solos compactados, as plantas necessitam deslocar partículas minerais (areia, argila, etc.), para alongar e expandir seus eixos radiculares. A grande maioria dos vegetais possui características que diferem-se entre espécies, tanto em sua conformação morfo-anatômica, como na sua biodinâmica de crescimento. Desta forma muitas espécies sofrem limitações de crescimento na presença de horizontes ou de camadas compactadas, ocorrendo freqüentemente o encurtamento e aumento do diâmetro dos eixos radiculares (Basso et al., 1999), além de alterações significativas da relação entre a espessura do córtex e a espessura do cilindro vascular das raízes (Queiroz-Voltan et al., 1998). No entanto, a simples redução no alongamento dos eixos principais não pode ser considerada como uma diminuição do crescimento radicular, e sim uma alteração na distribuição espacial das raízes, em proporção horizontal, já que em condições de limitação do crescimento radicular em profundidade, ocorre uma intensa proliferação de eixos laterais finos (secundários e de ordens superiores, com diâmetro < 0,8 mm) e pêlos radiculares (diâmetro < 0,1 mm), que contribuem para o aumento significativo da superfície específica radicular superficialmente (Dias Correia, 1986), o que pode ser limitante em regiões com períodos prolongados de seca. Por esta razão, a profundidade em que as camadas duras (compactadas) aparecem no solo determinará a importância agrícola do mesmo.

A estrutura é a propriedade física do solo que diz respeito à aglutinação das partículas primárias em partículas secundárias (agregados), delimitadas umas das outras por superfícies de fraqueza ou separadas por descontinuidades, dando origem a agregados de configurações peculiares (Hanks & Ashcroft, 1976). Esta propriedade exerce influência direta sobre o crescimento das raízes, reduzindo a sua extensão em função de alterações significativas provocadas pelo stress mecânico na elongação das diferentes espécies cultivadas (Goss et al., 1989).

Dexter (1988) define a estrutura do solo como sendo “a heterogeneidade espacial dos diferentes componentes do solo”, e por isto ainda existe uma grande lacuna na pesquisa, sobre métodos de estudos para determinar as interações entre a estrutura do solo e o desenvolvimento do sistema radicular, que precisam ser melhor desenvolvidos (Walley et al., 2000). A estrutura do solo controla os espaços vazios e, conseqüentemente, a quantidade de água e oxigênio que pode ser armazenada no solo e a velocidade com que são liberados para as raízes das plantas (Lavelle et al., 1992). Desta forma, a porcentagem de espaços vazios no volume do solo e, especialmente, seus aspectos geométricos, como número, tamanho, forma, distribuição, direção, continuidade e conexão são, portanto, bastante relevantes e podem alterar o crescimento das raízes.

A forma e a orientação dos agregados dentro do solo podem afetar a penetração das raízes, pois esses fatores influenciam o ângulo de contato no qual a coifa encontra a superfície dos mesmos. A chance de penetração é menor quando o ângulo de contato coifa-superfície do agregado é mais agudo. Por outro lado, a falta de ancoragem (apoio) em camadas mais soltas (frouxas) do solo pode impedir a penetração de raízes em camadas mais duras. Por exemplo, se a semente é plantada em solo desagregado e a plântula encontra uma crosta superficial, em vez de emergir poderá ser empurrada para baixo. Da mesma forma acontece com raízes, quando encontram superfícies duras, se a camada acima não oferecer apoio suficiente ela não conseguirá penetrá-la, mesmo que tenha força suficiente para tal (Rezende, 2000).

A infiltração e a capacidade de armazenamento de água também estão intimamente relacionadas com a porosidade do solo e as raízes das plantas. A dinâmica destas propriedades, pode sofrer modificações na sua porção superficial com o passar do

tempo, através de práticas de manejo como aração, tratos culturais, calagem, adubação, incorporação de matéria orgânica, dentre outras. Em solos onde a estrutura não é muito favorável sob as camadas superficiais ricas em matéria orgânica, é extremamente importante observar o controle da erosão superficial e a intensidade e métodos dos tratos culturais, pois estes, com o passar do tempo, podem degradar a boa estrutura da camada superficial e trazer sérias complicações ao arejamento (diminuição da porosidade), para as relações hídricas do solo, principalmente com relação à sua condutividade hidráulica (alterações na infiltração de água e no movimento de água entre camadas do solo). Tais alterações trazem como consequência sérias limitações físicas-químicas-biológicas, alterando negativamente o desenvolvimento do sistema radicular, contribuindo para o baixo desempenho das culturas (Libardi & van Lier, 1999).

A distribuição vertical das características radiculares dos vegetais também pode ser alterada em função da variação de textura nos horizontes superficiais e subsuperficiais do solo (Atkinson, 2000). Em solos argilosos as árvores muitas vezes formam raízes “dispersantes” concentradas no horizonte superficial, podendo muitas vezes o sistema radicular estar limitado às zonas de coveamento de plantio (Rezende, 2000). Os solos com textura homogênea (textura média a arenosa), ao longo de toda sua profundidade efetiva, apresentam normalmente uma distribuição radicular que declina conforme uma função exponencial decrescente (Gerwitz & Page, 1974; Nicoullaud et al., 1994; Brasil, 2001), o que pode ser alterado por ação de agentes de impedimento, como os já descritos anteriormente, ou em função do manejo do solo. Em solos com variação de textura entre os horizontes (Ex. A-AB-BA-Bt), ou com camadas de adensamento, tal distribuição passa a ser afetada de forma bimodal, ocorrendo zonas de acúmulo radicular após a camada de impedimento. No caso de solos coesos dos tabuleiros costeiros, estes apresentam normalmente uma redução grande da porosidade entre o horizonte superficial e subsuperficial. Cintra (1997), estudando um Podzólico acinzentado fragipan (Argissolo), encontrou uma redução de 41% a 34% entre o horizonte Ap e o BA (distribuição vertical bimodal), e salienta que esta redução deve, em grande parte, resultar da diminuição de macroporos do horizonte compactado.

A distribuição horizontal de raízes também pode ser afetada, uma vez que é comum observar agrupamentos de raízes concentrados em rachaduras, gretas ou covas de animais (Nicoullaud et al., 1994). Agrupamentos ou acúmulos de raízes no espaço ocorrem naturalmente em certas regiões, especialmente em sistemas radiculares que possuem elevado número de ramificações curtas por unidade de comprimento da raiz parental (Bengough et al., 2000). Um exemplo típico é a proliferação do sistema adventício de raízes nas gramíneas, nos primeiros centímetros do solo, onde a concentração de fatores de crescimento é maior que no subsolo.

Como propriedade química limitante, a acidez do solo é comum em todas as regiões onde a precipitação é suficientemente elevada para lixiviar quantidades apreciáveis de bases permutáveis das camadas superficiais dos solos (Cantarutti et al., 2004). Tão generalizada é a sua ocorrência e tão pronunciada a sua influência sobre os vegetais, que se transformou numa das mais discutidas propriedades do solo. Especificamente a presença de Al^{+3} a níveis tóxicos para a maioria das plantas cultivadas, é um dos principais fatores que limitam a produção agrícola (Ma et al., 2001). Particularmente, é na raiz que se verifica o principal sintoma de toxicidade e maior sinal de danos, sendo a inibição do crescimento longitudinal uma das características que pode variar entre espécies tolerantes e sensíveis, em diferentes graus (Kochian, 1995). Este cátion, quando em contato com as raízes, promove rapidamente a paralisação do crescimento radicular, tornando-as atrofiadas em função da morte ou

injúria do meristema radicular. Especificamente, a parte distal da zona de transição no ápice das raízes, onde as células estão entrando em fase de alongamento, é o sítio da ação tóxica primária do Al^{+3} (Sivaguru & Horst, 1998).

Ainda, o Al^{+3} , atua fixando fósforo em formas menos disponíveis nas superfícies da raízes, diminuindo a respiração desta, além de interferir na atividade das enzimas de fotofosforilação, reduzindo a absorção, transporte, e a eficiência de uso de água e vários nutrientes essenciais (Ca, Mg, K, P e Fe), entre outros efeitos diretos e indiretos (Nichol & Oliveira, 1995). Em síntese, plantas afetadas por Al também apresentam sintomas de deficiência de nutrientes, tais como P, Ca, Mg, K e Mo, devido à interferência do Al^{+3} nos processos de absorção, transporte e uso destes nutrientes. Tais deficiências aparentemente ocorrem porque o Al induz a deposição de calose nos canais plasmodesmáticos, inibindo fisicamente o transporte simplástico entre células (Sivaguru et al., 2000).

A disponibilidade de uma série de nutrientes do solo é influenciada pela sua faixa de pH. Assim a maior disponibilidade dos macronutrientes esta na faixa de pH ligeiramente ácida entre 5,5- 6,5 (Kiehl, 1979), porém em valores de pH >7,0 ocorre indisponibilidade de micronutrientes. Muitos autores apontam que na grande maioria das culturas o pH abaixo de 5,0 se torna limitante para o funcionamento e desenvolvimento das raízes, e conseqüentemente da produtividade das culturas (Dias Correia, 1986).

A matéria orgânica do solo contribui significativamente sobre diferentes aspectos diretos e indiretos, para o desenvolvimento e a dinâmica do sistema radicular. Funciona como fonte e reserva de nutrientes (N, P, S e micronutrientes); regula e determina a sucessão ecológica dos microorganismos do solo sustenta a atividade da macroflora; desempenha um papel importante nos processos pedogenéticos, já que participa na migração ou fixação de alguns elementos (Ca, Fe, Al) e argilas; através da interação organo-mineral faz parte do complexo sortivo do solo; contribui para a solubilização de P e diminuição da energia de fixação nos óxidos; diminui o efeito tóxico de metais (Al, Mn); possui propriedade tampão que permite estabilizar o pH do meio; adsorve substâncias tóxicas que podem contaminar o meio; libera grandes quantidades de CO_2 perto das folhas contribuindo para fotossíntese; possui substâncias catalíticas que aceleram o crescimento e desenvolvimento das plantas; regula o regime térmico e hídrico do solo; melhora a densidade; é fator determinante da criação de uma estrutura adequada ao solo (Kononova, 1982; Santos, 1984; Siqueira, 1985; Garcés, 1987; Almeida, 1991; Guerra, 1993, citados por Canellas, 1998). Atualmente inúmeros trabalhos vem destacando a importância das substâncias húmicas como bioativadoras do crescimento vegetal, alterando o arranjo tridimensional, com um aumento substancial da superfície específica do sistema radicular, além de atuar sob ativação das bombas H^+ -ATPase e na permeabilidade das membranas, com isto tornando-o mais eficiente nos processos de absorção de água e nutrientes (Fagbenro & Agboola, 1993; Pinton et al., 1995; Pinton et al., 1997; Façanha et al., 2002).

Outro aspecto a ser abordado na dinâmica do crescimento radicular, que governa as demais propriedades acima discutidas, é a própria natureza mineralógica dos solos. Tomando-se como exemplo solos Cauliniticos (K_i e $K_r > 0,75$) e solos Oxídicos ($K_r < 0,75$)? (Embrapa, 1999), que se diferem quanto ao grau de intemperismo, conseqüentemente apresentarão diferenças significativas nas propriedades físicas e químicas dos solos e de suas interações com o crescimento radicular das culturas. Como exemplo de propriedades físico-hídricas, podemos citar as diferenças entre os Argissolos (cauliníticos), que apresentam uma descontinuidade de capilaridade na transição do Horizonte A (mais arenoso) com o Horizonte Bt (argiloso), onde é

observada maior microporosidade no horizonte B do que no A, e o inverso em relação a macroporosidade, com influência direta na maior umidade da camada subsuperficial. Comparativamente, a homogeneidade da macro e microporosidade em todos os horizontes dos Latossolos (em especial os oxídicos), facilita a evaporação da água, sua drenagem, e conseqüentemente a distribuição do sistema radicular em profundidade. Embora os Latossolos com propriedades físicas mais favoráveis que os Argissolos, devido a seu estágio avançado de intemperismo, inúmeros problemas de natureza química são acentuados, tais como: pH, alumínio, baixo conteúdo de matéria orgânica, baixa CTC, fósforo, etc. (Resende et al., 1995; Oliveira, 2001). Tais propriedades conforme já descrito anteriormente alteram o crescimento radicular, sendo encontrados na literatura inúmeros trabalhos, sobre o manejo e correção dos solos, principalmente através de calagem (Goedert et al., 1985) e adubações de NPK, em solos da região do Cerrado brasileiro, com predomínio de solos oxídicos (Oliveira, 2000).

Apesar de representarem uma pequena fração dos constituintes orgânicos do solo, as raízes exercem também grande influência direta e indireta, na formação e estabilidade dos agregados no ambiente edáfico (Tisdall, 1996; Silva & Mielniczuck, 1997). A dinâmica radicular, através da transferência direta dos produtos da fotossíntese para a matriz do solo, tem sido considerada a principal força propulsora na manutenção da qualidade do solo. Tais produtos são representados pelo tecido radicular vivo, exsudatos e diversos constituintes orgânicos derivados das raízes em crescimento, raízes mortas e pelos radiculares, além de microrganismos rizosféricos e seus subprodutos de elevado poder agregante (Anghinoni & Mielniczuck, 1999). Estes compostos, ao se associarem com a matéria mineral do solo, formam agregados estáveis em água, onde permanecem menos acessíveis ao ataque de microrganismos decompositores (Oades, 1978; Haynes & Beare, 1996, Tisdall, 1996).

As raízes atuam na primeira fase de formação dos agregados, sendo este um resultado de interações de componentes físicos, químicos e biológicos, onde os principais agentes são o clima, as raízes, os microrganismos, a fauna e o próprio tracionamento do solo (Silva & Mielniczuck, 1997). Durante seu crescimento, exercem pressões biofísicas (axial e radial), no seu avanço através do espaço poroso, aproximando as partículas minerais, e conseqüentemente aumentando a densidade do solo nas regiões mais próximas à superfície radicular. Paralelamente a absorção de água pelas raízes ocasiona um secamento das partículas adjacentes, provocando pressões capilares que intensificam a compressão dos grânulos minerais.

Como componente bioquímico, o ambiente da rizosfera, rico em energia, estimula a proliferação de microrganismos que liberam substâncias húmicas e polissacarídeos responsáveis pela estabilização dos microagregados formados (partículas < 250 μm), e sua aglutinação em unidades maiores. Ao lado desta atividade, que ocorre enquanto o sistema radicular está em crescimento, a matéria orgânica oriunda da decomposição do tecido radicular após a sua senescência, raízes não decompostas, hifas de fungos e micorrizas também atuam na formação e estabilização, principalmente dos macroagregados (partículas > 250 μm) (Haynes & Beare, 1996; Mielniczuck, 1999).

Em conjunto, e analisando a dinâmica radicular, através de seus processos bioquímicos e físico-químicos em interação com a matriz mineral do solo, pode-se admitir que o sistema radicular é o principal componente formador dos micro e macroagregados do solo. Porém, a ação das raízes finas ($\leq 800 \mu\text{m}$) e dos pêlos radiculares (1 mm de comprimento por 10 μm de diâmetro) (Dias Correia, 1986), tanto pelo seu arranjo tridimensional (distribuição espacial, vertical e horizontal), que pode contribuir com mais de 90 % da área superficial e do comprimento radicular total (alta

superfície específica) (Brasil, 2002), em conjunto com os processos de absorção de água e exudação de substâncias orgânicas, constituem a fração do sistema radicular mais efetiva na gênese e estabilidade dos agregados do solo (Haynes & Beare, 1996; Mielniczuck, 1999).

Em adição aos componentes de formação dos agregados e a própria morfologia radicular, uma análise comparativa pode ser feita, quando da dinâmica (crescimento e renovação) de um sistema radicular denso, bem desenvolvido e atuante por vários anos no mesmo local, como por exemplo o das gramíneas forrageiras perenes, verificamos que o mesmo distribui uniformemente os efeitos de agregação em toda a matriz do solo, por favorecerem as ligações dos pontos de contato entre partículas minerais e constituintes orgânicos, quando comparado com as culturas anuais, cujo sistema radicular é menos desenvolvido e atua por curtos períodos de tempo no solo (Doormar & Foster, 1991; Silva & Mielniczuck, 1997; Pinheiro et al., 2004).

2.3 Os Métodos de Estudo de Raízes

O solo, enquanto meio de crescimento opaco, provê uma barreira para a observação e para a avaliação *in loco* dos sistemas radiculares (Matta, 1999), o que significa que o pesquisador trabalha constantemente “no escuro” (Bengough et al., 2000). Extrair raízes do solo através de escavação continua a ser um dos procedimentos mais usados nos estudos de raízes (Smit et al., 2000).

Os métodos de estudo podem ser agrupados segundo vários critérios, dependendo da finalidade dos mesmos (Kolesnikov, 1971). Nesse sentido, os propósitos podem ser variados, indo desde simples estimativas da profundidade de enraizamento ou biomassa radicular até complexas quantificações de demografia radicular, em estudos de ciclagem de raízes (van Noordwijck, 1987; Fitter et al., 1996; Bengough et al., 2000; Hooker et al., 2000).

Não existe um único método de estudo isolado capaz de atender aos múltiplos enfoques sobre sistemas radiculares nas áreas de ecologia, de produção animal e vegetal, assim como também, independentemente de sua finalidade, todos apresentam vantagens e limitações (Bengough et al., 2000).

Todos os métodos de avaliação da estrutura e função de sistemas radiculares em condições de campo estão baseados no princípio de separação e lavagem das raízes do solo no qual crescem (Bohm, 1979), e, portanto são de natureza destrutiva, tanto para o sistema radicular em estudo como para o ambiente imediato (Kolesnikov, 1971; Oliveira et al., 2000). Por isso, durante a fase de planejamento dos experimentos, deve-se refletir sobre a necessidade (e possibilidade) de se remover um dado volume de solo com finalidade amostral (Atkinson, 2000). Em parte, isto estará ditado pelo nível de conhecimento prévio das características da planta e das propriedades do solo.

Estas técnicas destrutivas fornecem importantes informações sobre as avaliações quantitativas da morfologia do sistema radicular, uma vez que a amostra extraída exprime a real distribuição das raízes no volume de solo, sendo estes considerados padrões para a calibração dos demais métodos de análises qualitativas. Entretanto, estes métodos contribuem muito pouco para o conhecimento sobre a dinâmica específica das raízes, em maior parte devido à alta variabilidade entre plantas e o próprio solo, já que não é possível nestas amostras perturbadas, fazer medições *in vivo* e de forma contínua no tempo de uma mesma raiz ou de uma mesma planta (Johnson et al., 2001).

É conveniente que a estrutura total do sistema radicular seja apreciada antes de se proceder ao seu estudo quantitativo no campo (Bengough et al., 2000). Para esse propósito, a criação de planos de observação, através da escavação de trincheiras, ainda é a alternativa mais completa possível (Brasil, 2001). A principal desvantagem é que a

escavação de grandes volumes de terra não é uma prática bem-vinda em muitas situações, especialmente tratando-se de pequenas parcelas experimentais (van Noordwijk et al., 2000). Dependendo das dimensões, esta prática implica num investimento de tempo e labor considerável: na escavação de um volume de $1,5 \text{ m}^3$ de um solo com uma densidade global média de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ se remove mais de quatro toneladas de terra, justificando, por vezes, o uso de máquinas especialmente desenhadas, tais como dispositivos hidráulicos transportados por trator (Bohm, 1979; Oliveira et al., 2000), ou adaptadas, como retro-escavadeiras e similares.

Do lado positivo, entretanto, a observação direta fornece uma estimativa rápida da distribuição total do sistema radicular, tal como naturalmente existe (Bohm, 1979) e pode dar informação detalhada sobre os padrões espaciais das raízes na sua interação com as características físicas, químicas e biológicas do perfil do solo (van Noordwijk, 2000). Justamente, esse tipo de informação pode guiar o uso de outros procedimentos mais rápidos e menos destrutivos (Bengough et al., 2000).

A partir da parede do perfil, podem ser destacados volumes prefixados de solo, com estrutura indeformada, usando-se um conjunto de técnicas chamadas, por Bohm (1979) de “métodos de monolito”. Os monolitos possuem tamanho e formas variadas, sendo escavados diretamente a partir da parede do perfil, ou extraídos com moldes metálicos. Quando o volume a ser extraído é relativamente grande, existe a necessidade de sustentar a massa de solo, para preservar a sua estrutura, uma técnica conhecida como “pinboard method” (“prancha de pregos”, Fernandes et al., 1999).

Quando, por diversas razões, não é conveniente ou necessária a abertura de trincheiras, o método mais apropriado, em termos de facilidade de execução, consiste na extração de amostras com cilindros metálicos de volume conhecido, com ajuda de um trado operado manualmente, ou com uso de amostradores mecanizados (Bohm, 1979). É o método mais amplamente usado, e considerado como padrão para a determinação da densidade radicular (Bengough et al., 2000). Sua ampla aceitação, em parte, decorre da possibilidade de obter-se um elevado número de repetições com um investimento de tempo e labor menor que nos outros métodos, o que pode significar uma vantagem em termos estatísticos. Embora Bengough et al. (2000) mencionem que os problemas com este método estão restritos à possibilidade de perdas significativas de raízes finas (até 30 %).

Bohm (1979) e van Noordwijk (1987) chamaram a atenção para outros problemas. O pequeno diâmetro dos cilindros (em geral 5,0 cm) pode ser uma desvantagem na amostragem de camadas com baixas densidades radiculares, a menos que o número de repetições seja aumentado. Podem existir problemas de compactação, fazendo que o volume de solo indeformado contido no cilindro, varie com a profundidade de amostragem. Bohm (1979) observou ainda, que este método não se adapta bem aos estudos de morfologia radicular.

Uma alternativa é preparar o perfil convenientemente e mapear as raízes expostas, quantificando a sua posição no perfil, ou contando as suas interseções sobre uma tela reticulada, no método conhecido como da parede do perfil. Este método fornece informações sobre o número de raízes por unidade de superfície do perfil (Bohm, 1979). É possível, teoricamente, calcular a densidade radicular a partir da densidade de interseções das raízes com um plano, porém os dados de campo mostram que o emprego destas fórmulas tende a negligenciar uma grande proporção de raízes finas, conduzindo a subestimativas da densidade radicular. Estas técnicas de mapeamento de raízes exigem, portanto a sua calibração contra um método volumétrico, e são consideradas como procedimentos indiretos (Dowdy et al., 1998). Sua melhor

aplicabilidade consiste na medição da distribuição espacial de raízes individuais (Bengough et al., 2000).

Uma vez extraídas do solo, as raízes devem ser recuperadas quantitativamente, o que é feito por meio de lavagens e peneiramentos sucessivos. Esta etapa é a considerada a mais crítica, em função da existência de várias fontes de erro, sendo as mais comuns: perda de raízes finas; perdas de massa seca; separação incompleta de raízes, solo e serrapilheira; dificuldades na distinção entre raízes vivas e mortas, e diferenças entre operadores na execução de uma mesma função (Bohm, 1979; van Noordwijk, 1993; Oliveira et al., 2000).

Algumas fontes de erro são quase que inevitáveis: da mesma forma que é impossível, sob condições de campo, recuperar a totalidade do sistema radicular de uma planta, é quase impossível evitar as perdas de algumas raízes, especialmente das muito finas, na etapa de lavagem e limpeza (Oliveira et al., 2000). Talvez por causa disso, a maioria das recomendações e modificações de metodologia aponta para a minimização desse tipo de erro.

Por exemplo, é recomendável que as amostras sejam preparadas para análise no menor prazo possível a partir de sua extração no campo. Entretanto, por causa de uma capacidade de trabalho limitada, pode acontecer que as mesmas não possam ser processadas com a rapidez desejável. Nesse caso, devem ser tomadas providências para minimizar as perdas de massa seca (ou mesmo a desidratação) das raízes, que podem ser tão altas quanto 50 %, como resultado de procedimentos inadequados de conservação das amostras (Floris & Van Noordwijk, 1984). A melhor solução possível para a minimização dos erros associados à recuperação, limpeza e classificação de raízes, consiste na rigorosa padronização de todas as fases e o emprego de uma mesma equipe de operadores treinados no uso dos mesmos critérios de trabalho (Oliveira et al., 2000).

A etapa final do trabalho consiste na quantificação dos parâmetros de interesse. Em estudos sobre capacidade absorptiva do sistema radicular, o comprimento e a área superficial das raízes são parâmetros importantes (Rossiello et al., 1995), enquanto o influxo líquido de nutrientes é influenciado pelo diâmetro radicular e distância média entre raízes (França et al., 1999). Outros estudos, ligados à produtividade primária, demandarão dados sobre as quantidades totais de biomassa e sua partição entre parte aérea e raízes (Roberts et al., 1993).

Durante muitos anos, o tempo gasto nas atividades de quantificação desses parâmetros, e as incertezas quanto aos resultados, constituíram fortes desestímulos ao trabalho com raízes.

A introdução de técnicas de contagem de interseções (Newman, 1966; Tennant, 1975), para a estimativa do comprimento radicular, assim como a adaptação de sistemas detectores fotoelétricos para a medição da área radicular projetada (Kemp, 1976; Rossiello et al., 1995) representaram avanços sobre as técnicas puramente manuais. Embora continuem em uso para propósitos especiais, esses métodos sofrem de variadas restrições (Richner et al., 2000). Outro passo importante foi dado com o uso de sistemas baseados em câmeras de vídeo (Lebowitz, 1988).

Com o advento da moderna tecnologia digital, parte do esforço envolvido na quantificação de parâmetros, tem sido consideravelmente amenizada, com a introdução de softwares de análise de imagens, que além de automatizar o processo antes realizado manualmente, possibilitam extrair novas informações morfológicas (Dowdy et al., 1998; Richner et al., 2000, Brasil, 2001). Por exemplo, Farrell et al. (1993) mostraram que os coeficientes de variação de medições repetidas de comprimento radicular entre diferentes operadores, são usualmente maiores com o uso da técnica manual de Tennant do que usando métodos digitais.

De forma inovadora estudos utilizando o método do minirhizotron (tubo transparente de acesso ao solo) acoplado a câmeras de vídeo digitais tem nos feito avançar para os estudos temporais dos parâmetros radiculares em condições naturais sem perturbação do ambiente de crescimento das raízes (Ferguson & Smucker, 1989; Johnson et al., 2001; Dawson et al., 2003). No capítulo IV deste trabalho será apresentado um capítulo dedicado ao tema do minirhizotron aplicado aos estudos de raízes de gramíneas forrageiras.

Com o objetivo de estudar as questões relativas à aplicação de métodos estatísticos no estudo da variabilidade espacial de raízes, nos capítulos II e III são apresentados dois estudos com uma breve revisão sobre o assunto, sendo o primeiro relativo à estatística paramétrica e o segundo sobre a aplicação das ferramentas da geoestatística.

3. CAPÍTULO I

**EFEITOS DA QUEIMA E DO CORTE MECÂNICO DA
PASTAGEM SOBRE AS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS
DO SISTEMA RADICULAR DE *BRACHIARIA HUMIDICOLA*:
UM ESTUDO A PARTIR DO MÉTODO DA TRINCHEIRA**

RESUMO

Apenas a determinação da massa seca radicular no perfil é insuficiente para detectar os efeitos das interações solo-planta e do manejo das pastagens, e deve ser complementada com o comprimento, diâmetro e área total das raízes. O presente estudo objetivou avaliar através do método da trincheira, associado à extração seqüencial de volumes fixos de solo+raiz e o processamento digital de imagens; além de detectar os efeitos sazonais e de práticas de renovação das pastagens sobre o padrão de variabilidade espaço-temporal da morfologia radicular de *Brachiaria humidicola*. Após o período seco, foram selecionadas três parcelas experimentais com 60 m², nas quais foram efetuados os seguintes tratamentos: T0 – testemunha, T1 – queima e T2 – roçada. Foram realizadas duas observações na estação chuvosa e duas na época da seca. Foram amostradas secções de 0,1 m até a profundidade de 0,7 m, utilizando-se uma metodologia de escavação e extração de volumes de solo (1 dm³). Após a lavagem e separação em água corrente, as raízes foram classificadas por diâmetro em grossas (>2 mm), médias (1,5 – 2,0 mm), finas (0,8-1,4 mm) e muito finas (<0,8 mm). As imagens das raízes foram processadas através do programa de computação SIARCS[®] para a quantificação da área e do comprimento radicular. Os dados de massa e comprimento foram convertidos para densidade radicular por unidade de volume e de área superficial do solo. Também foram obtidos os valores de comprimento radicular específico. Os valores da densidade radicular ajustaram-se ($R^2 > 0,90$) a uma função exponencial decrescente, tendo-se constatado uma maior concentração de raízes até à profundidade de 0,2 m, da ordem de 80% e 76% do comprimento radicular total, e de 70% e 78% da massa seca, respectivamente, nos tratamentos T2 e T0. No tratamento T1 foi observada uma significativa redução desta percentagem, com valores da ordem de cerca de 65% do comprimento e 60% da massa seca radicular, na camada 0-0,2 m. Neste tratamento, em todas as datas de amostragem, foi observado um aumento significativo da densidade radicular nas camadas abaixo de 0,2 m de profundidade, com maior relevância durante o período de seca. A fração das raízes muito finas contribuiu, em média, com mais de 80% do comprimento radicular total, porém esta contribuição foi reduzida na maior profundidade, nomeadamente em T2, onde passou de 86 % na profundidade 0-0,1 m para 69% a partir de 0,3 m. As raízes muito finas representaram em média 55% da massa total, porém na área queimada esta contribuição foi superior a 68% abaixo de 0,3 m profundidade, havendo uma menor proporção de raízes médias e grossas. De forma contrária, houve um aumento significativo da proporção de massa alocada em raízes de maior diâmetro nos tratamentos testemunha e na roçada. O comprimento radicular específico do tratamento queimado em média foi 5m g⁻¹ maior que os demais durante o período seco. Estes valores demonstram que, na área queimada, ocorreu um estímulo à expansão radicular, com um maior crescimento e produção de raízes finas em profundidade, para a absorção de água e nutrientes em profundidade durante o período seco.

Palavras chave: Densidade radicular, monólito, análise de imagens.

ABSTRACT

Only the determination of the root mass in the soil profile is not sufficient to evaluate soil-plant interactions and pasture management effects, and it must be complemented with information about length, diameter and area of the roots. The objective of this study was to evaluate root systems by the trench method, associated with sequential extraction of fixed volumes of soil+root and digital image processing; besides of detecting seasonal effects and from practices of pasture renewing on patterns of spatial and temporal variability of root morphology of *Brachiaria humidicola*. After the dry season, the following treatments were installed in three plots with 60 m²: T0 – control, T1 – burning and T2 – cutting. Two evaluations in the raining season and two evaluations in the dry season were performed. Soil layers of 0.1m were sampled up to the 0.7 m deep, using a method of digging and extracting soil volumes (1dm³). After washed and separated in running water, the roots were classified by their diameter as thick (>2 mm), medium (1.5 – 2.0 mm), fine (0.8-1.4 mm) and very fine (<0.8 mm). Root images were processed using the software SIARCS[®] to quantify the root area and length. Data of root mass and length were transformed to root density per unit of soil volume and soil superficial area. Values of specific root length were also obtained. Values of root density were adjusted ($R^2 > 0.90$) to a decreasing exponential function. There was a higher root concentration until the 0.2 m deep, about 80% and 76% of the total root length, and about 70% and 78% of total dry mass, respectively, in T2 and T0 treatments. In T1 treatment, a significant reduction of this percentage occurred, with values about 65% of root length and 60% of root mass, in the 0-0.2 m deep. In this treatment, for every time of sampling, there was a significant increase of root density in the layers deeper than 0.2 m, with a higher relevance during the dry season. The very fine roots contributed, in average, with more than 80% of the total root length, but this contribution was reduced in deeper layers, namely in T2, where it changed from 86 % in the 0-0.1 m deep to 69 % after the 0.3 m depth. The very fine roots represented in average 55% of total mass, but in the burned area this contribution was higher than 68% after the 0.3 m depth, with a lower proportion of medium and thick roots. Contrarily, there was a significant increase in the proportion of mass allocated in roots of greater diameter in the T0 and T2 treatments. The specific root length in the burned treatment was in average 5m g⁻¹ higher than other treatments during the dry season. These values demonstrate that, in the burnt area, there was a stimulus to root expansion, with a greater growth and production of fine roots in deeper layers, to increase water and nutrient absorption during the dry season.

Keywords: Root density, monolith, image analysis.

3.1 INTRODUÇÃO

Existe muita pouca informação sobre vários aspectos do crescimento e desenvolvimento de sistemas radiculares em ecossistemas de pastagens tropicais. Estima-se que menos de 10 % dos estudos mundiais sobre pastagens, tenham feito medições diretas da produção da sua biomassa subterrânea (Scurlock & Hall, 1998).

A coleta de dados relativos à produção e distribuição de biomassa radicular no campo, enquanto enfoque necessário em estudos sobre ciclagem de carbono orgânico no solo (Vogt et al., 1998) e de seqüestro de CO₂ em pastagens de clima temperado e tropical (Scurlock & Hall, 1998), não avalia as influências diretas ou indiretas que as raízes exercem sobre as atividades químicas e biológicas do solo, nem a própria capacidade dos sistemas radiculares na aquisição de recursos abióticos (van Noordwijk & Van Gein, 1996; Vogt et al., 1998). O estudo de todos esses aspectos, que relacionam a distribuição radicular a suas funções e interações com o solo, demandam dados de comprimento ou área superficial de raízes, os quais são mais apropriados do que os parâmetros baseados em biomassa radicular (Rossiello et al., 1995; Dowdy et al., 1998; Costa et al., 2000).

A geometria e a dinâmica do sistema radicular das gramíneas forrageiras tem importante papel na dinâmica global do ecossistema pastoril, através de efeitos sobre a absorção de nutrientes de baixa mobilidade, como fósforo (Rao et al., 1996), o estabelecimento de associações com a biota do solo (Tisdall, 1996), a descompactação do solo e penetração de horizontes sub-superficiais argilosos (Clark et al., 1998) e a captura de água e nutrientes em profundidade (Guenni et al., 2002).

A escassez de dados sobre raízes é explicável, em parte, pelas dificuldades impostas pela própria natureza do objeto de estudo. Embora estejam disponíveis uma série de técnicas indiretas e não destrutivas de avaliação do sistema radicular (Jonhson et al., 2001), os métodos de extração, os quais removem um volume fixo de solo, são tidos como os de maior precisão e considerados como padrão de calibração de outras técnicas de estudo (van Noordwijk, 1993; Dowdy et al., 1998). Por outro lado, a tecnologia digital tem amenizado, consideravelmente, o esforço envolvido na quantificação dos parâmetros de interesse, com a introdução de softwares de análise de imagens, que possibilitam a automatização do trabalho, antes realizado manualmente (Jorge et al., 1996; Ritchner et al., 2000).

O presente trabalho apresenta um método de estudo de raízes baseado no método de escavação- extração de volumes fixos de solo, a partir de uma trincheira, acoplada ao uso de análise digital de imagens.

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar com este método a partir de uma trincheira, a possibilidade de detectar os efeitos sazonais e de práticas de renovação das pastagens sobre o padrão de variabilidade espaço-temporal da morfologia radicular de *Brachiaria humidicola*, uma gramínea forrageira perene de amplo espectro de difusão na pecuária brasileira.

Foram objetivos específicos deste trabalho:

- Estudar a distribuição vertical e temporal do sistema radicular da pastagem, em relação à profundidade do solo;
- Determinar a contribuição das classes de diâmetro das raízes à densidade radicular total, com base na massa seca, na área superficial e no comprimento radicular total.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Localização

O estudo foi conduzido em uma pastagem com aproximadamente 3 ha de *Brachiaria humidicola*, implantada em 1985 (Figura 1), em uma área experimental do Instituto de Zootecnia da UFRRJ, no Setor de Caprinocultura. As coordenadas geográficas locais são: 22° 46' S e 43° 42' W e altitude de 33 m sobre o nível do mar. O período experimental foi de 12 meses, entre agosto de 1999 e agosto de 2000.



Figura 1. Vista parcial do local do experimento e da pastagem de *Brachiaria humidicola*. UFRRJ, Instituto de Zootecnia, Setor de Caprinocultura. Seropédica, RJ.

3.2.2 Clima

O clima da região é caracterizado como quente e úmido no verão, sem inverno pronunciado e muito seco. Este tipo climático, embora não corresponda exatamente ao clima de savanas, enquadra-se no tipo Aw da classificação de Köppen.

Martorano et al. (1997) analisaram uma série de 37 anos de dados meteorológicos (1960-1996), obtidos junto à Estação Experimental de Itaguaí, da Pesagro-Rio, distante aproximadamente 2 km da área experimental. Os resultados de sua análise indicaram uma precipitação média anual de 1224,9 mm, (que ocorre dentro da faixa compreendida entre 1166-1266 mm), com um período de retorno de 5 anos. As maiores precipitações ocorrem normalmente no período verão-outono, concentrando-se entre dezembro (188 mm), janeiro (194 mm) e fevereiro (147 mm), com 43 % da chuva total anual. Entre os meses de março (162 mm), abril (102 mm) e maio (58 mm), observa-se uma progressiva redução da intensidade e frequência das chuvas, e o trimestre junho (36 mm)-julho (30 mm)-agosto (37 mm) é normalmente o mais seco, acumulando 8,4 % da chuva total anual. Na primavera, verificou-se a maior flutuação das chuvas, principalmente no mês de setembro (69 mm), associada a uma tendência de aumento das chuvas nos meses de outubro (91 mm) e novembro (126 mm).

A temperatura média anual é de 23,6 °C, com máximas e mínimas de 29,2 e 19,2 °C, respectivamente. Dentro da série analisada por Martorano et al. (1997), a menor

temperatura média mensal foi de 9,4 °C, no mês de junho de 1995. A umidade relativa do ar mostra pouca variabilidade sazonal, registrando-se no mês de agosto a menor média mensal (69 %). Matorano et al. (1997) apontaram para a necessidade de uma análise dos dados diários para poder avaliar melhor a ocorrência e duração dos períodos secos na área de estudo.

No presente trabalho foram considerados os dados diários de precipitação e temperatura média, máxima e mínima, durante o período de coleta de amostras, de agosto de 1999 a outubro de 2000, que são apresentados na Figura 2.

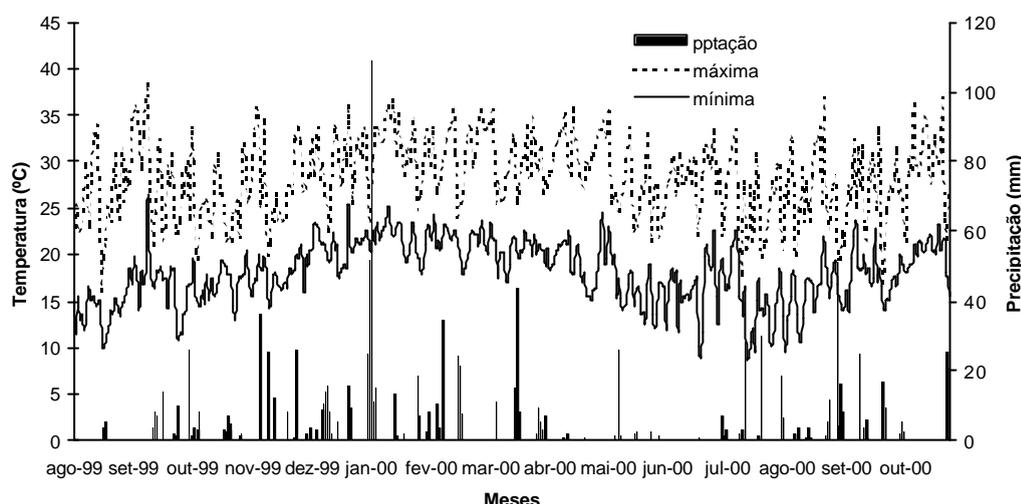


Figura 2. Valores diários de precipitação e temperatura máxima e mínima durante o período de realização do estudo (agosto de 1999 a outubro de 2000).

3.2.3 Solo

O solo do local, classificado como Planossolo A fraco textura arenosa/argilosa (Ramos et al., 1973), apresenta, a partir de 0,6-0,7 m de profundidade, um horizonte Btx muito coeso, sobre relevo suave ondulado com declividade variando de 2 a 7 % e imperfeitamente drenado, conforme descrito por Brasil (2001). A Tabela 1 apresenta algumas propriedades físicas e químicas deste solo. Pode-se destacar a baixa fertilidade natural do mesmo, principalmente com relação a matéria orgânica e os níveis de fósforo e nitrogênio.

Tabela 1. Características químicas e físicas do Planossolo háplico do campo experimental da Zootecnia na UFRRJ (Brasil, 2001).

Profundidade (m)	Horizonte	Textura	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	H+Al	Al ³⁺	pH	C	P	K
			cmol _c d m ⁻³	cmol _c d m ⁻³	TFSA		H ₂ O g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
0 – 0,1	A _p	Arenosa	0,6	0,3	0,7	0,3	4,9	3,09	5	75
0,1 – 0,2	A / AE	Arenosa	0,5	0,2	0,5	0,2	5,1	2,75	7	66
0,2 – 0,3	AE / E	Arenosa	0,5	0,2	0,4	0,1	5,3	2,12	4	45
0,3 – 0,4	E	Arenosa	0,5	0,3	0,7	0,2	5,0	1,64	3	70
0,4 – 0,5	E / EB _{tx}	Franco Arenosa	0,6	0,3	1,3	0,4	4,8	1,25	4	86
0,5 – 0,6	EB _{tx}	Franco Arenosa	0,7	0,5	1,6	0,8	4,9	0,96	2	78
0,6 – 0,7	B _{tx}	Franco Argilo-Arenosa	0,6	0,5	1,5	1,0	4,8	1,04	1	80

3.2.4 Pastagem

Este estudo foi conduzido em uma pastagem produtiva de *Brachiaria humidicola*, implantada em 1985 (Figura 1). Desde a sua implantação até o presente, não há registro de aplicação de adubos ou corretivos na mesma. Eventualmente, durante estes anos, foram realizados cortes por desfoliação mecânica ou queimas, como prática de renovação da pastagem após o período seco do inverno.

Em relação ao seu uso, a pastagem tem sido largamente sub-utilizada, tendo sido eventualmente pastejada por bovinos e mais freqüentemente por caprinos (Dr. J.B. R. de Abreu, IZ/UFRRJ, comunicação pessoal). Provavelmente, esta baixa pressão de pastejo seja parcialmente responsável pelo vigor da pastagem.

Certos atributos positivos da *B. humidicola* como a forte capacidade de enraizamento a partir dos nós estoloníferos, induzindo uma rápida cobertura do solo e agressividade frente a invasoras, seus baixos requerimentos nutricionais, particularmente de P e Ca e sua adaptação a solos pobremente drenados (Rao et al, 1996) ajustam-se bem ao sítio experimental escolhido.

Durante o período experimental não houve interferência por pastoreio de nenhuma espécie animal, nas áreas escolhidas para o presente estudo.

3.2.5 Simulação dos tratamentos

No final do mês de setembro de 1999, após o período do inverno (seca), foram selecionadas três áreas representativas da pastagem, para a instalação das parcelas experimentais, que mediam 6 m de largura por 10 m de comprimento, totalizando 60 m² de área.

Para efeito dos tratamentos, em duas destas áreas foram simuladas duas práticas distintas de renovação da pastagem, objetivando remover toda a fitomassa aérea das plantas, sendo estes os seguintes:

- **T0**: Testemunha (pasto vedado “diferido”, sem interferência humana e animal, critério para comparação sem estímulo de rebrota);
- **T1**: Queimada de toda a fitomassa aérea;
- **T2**: desfolha mecânica a 5 cm de altura do solo (roçada, com auxílio de uma roçadeira costal), sendo todo o resíduo da fitomassa aérea retirado do local.

3.2.6 Amostragem

As amostras foram coletadas utilizando-se as metodologias de escavação de trincheiras e da extração de monolitos metálicos de 1 dm³ de volume. Foram realizadas quatro observações no ano de 2000, sendo duas na estação chuvosa (fevereiro e abril) e duas na época da seca (junho e agosto).

Inicialmente, em cada um dos tratamentos, na primeira data de amostragem, foi escavada manualmente uma trincheira com dimensão inicial de 1,2 m de profundidade e 1,5 m de largura, perfazendo três trincheiras fixas no total. Esta estratégia de utilizar uma única trincheira por tratamento foi adotada com o objetivo de minimizar o custo operacional e reduzir a carga de trabalho e destruição da parcela, já que cada trincheira representava uma movimentação inicial de aproximadamente três metros cúbicos de solo com uma densidade média de 1,56 Mg m⁻³. Nas paredes da trincheira foi efetuado um acabamento com a pá reta e um gabarito de madeira, de forma a deixa-las lisas e verticais (BÖHM, 1979). Para efeito de repetição dentro das trincheiras, foram utilizadas três paredes (três faces da trincheira) para a coleta de quatro seqüências de amostras (repetições), sendo retidas duas seqüências na parede frontal e mais uma seqüência de amostras de cada parede lateral, além da quarta parede, que foi sendo

danificada pelo armazenamento do solo extraído. Em cada data de coleta seguiu-se uma mesma rotina de escarificação da parede do perfil, cerca de 0,5 m, para remover o solo exposto da coleta anterior, visando eliminar raízes eventualmente mortas por corte durante a amostragem anterior ou por dessecação a partir da superfície do perfil.



Figura 3. Estratégia para a amostragem vertical dos volumes de solo+raiz através do monólito metálico.

A amostragem foi realizada verticalmente em seções de 0,1 x 0,2 m, até a profundidade de 0,7 m, sendo retirados de cada seção volumes de solo+raiz de 1,0 dm³ com monólito de 0,1 x 0,2 x 0,05 m, os quais foram condicionados em sacos plásticos para posterior lavagem e separação das raízes (Figura 3).

3.2.7 Preparação das raízes

Após a extração do volume de solo, as raízes foram separadas por lavagem manual, através de uma adaptação da técnica de decantação-flotação proposta por Schuurman & Goedewaagen (1971). Inicialmente, as amostras foram colocadas em baldes de 10 litros, e as raízes visíveis retiradas manualmente e depositadas sobre duas peneiras de 2,0 e 0,25 mm de malha, sendo ali mantidas sob um jato suave de água corrente. A seguir adicionou-se água corrente aos baldes, e a amostra foi agitada manualmente, de forma que as raízes e seus fragmentos ficassem em suspensão. O sobrenadante foi peneirado, sendo este processo repetido até a completa recuperação das raízes visíveis, o que demandou, em média, cinco ciclos de peneiramento por amostra.

As raízes lavadas e recuperadas na peneira de 2,0 mm foram transferidas para bandejas plásticas (260 x 380 mm) para proceder a sua separação e classificação. Nas amostras provenientes das camadas superiores do perfil (0-0,2 m), foram tomados cuidados especiais para a separação de impurezas, tais como resíduos minerais, de parte aérea e sementes (*root debris*). Este processo foi feito por uma seqüência de lavagem, decantação e catação manual dos detritos maiores, complementada com auxílio de pinças para a retirada das partículas menores.

Para a separação das raízes, foi utilizada uma tesoura para seccionar os eixos radiculares em primários, laterais de 1^a ordem, de 2^a ordem e superiores. Isto foi feito com o objetivo de classificar manualmente os eixos pelo seu diâmetro. Para tal, as raízes foram agrupadas, segundo avaliação visual, nas seguintes classes de diâmetro: grossas (>2 mm), médias (1,5 – 2,0 mm), finas (0,8-1,4 mm) e muito finas (<0,8 mm).

As raízes lavadas foram conservadas em uma solução de formaldeído 2% e refrigeradas em geladeira a uma temperatura de 5 °C, até que fossem definitivamente processadas. Este procedimento visou minimizar as perdas de massa seca das raízes pela respiração e degradação microbiana, fato este que tem sido mencionado freqüentemente na literatura (van Noordwijk, 1987; Oliveira et al., 2000), como sendo uma das grandes limitações nos estudos de raízes, principalmente por perdas das classes de menor diâmetro. Após a digitalização, as raízes foram secas em estufa a 65 °C por 48 h e posteriormente pesadas em balança analítica com precisão de 0,1 mg.

3.2.8 Quantificação das raízes por processamento digital de imagens

O processamento digital das imagens das raízes foi feito seguindo a experiência prévia descrita por Brasil (2001), sendo a digitalização das imagens realizadas em um scanner de mesa da marca Genius Color Page-CS com 300 dpi (pontos por polegada) de resolução ótica. Esta resolução foi utilizada para que fosse possível medir objetos com diâmetro mínimo de 0,16 mm (Shannon, 1949), considerando o diâmetro de raízes muito finas como inferior a 0,8 mm.

Os eixos radiculares foram dispostos diretamente sobre o vidro do scanner e quando necessário foram afastados com pinça, evitando-se a sua sobreposição. Sobre as raízes foram colocadas folhas brancas de papel tipo ofício com o objetivo de criar um contraste de fundo, contendo ainda uma escala de 10 mm, para ser usada como parâmetro de referência de medida, no software de análise de imagem utilizado.

Os arquivos de imagem obtidos pelo scanner foram salvos em formato BMP (bit map, Microsoft - Windows) para posterior processamento, procurando-se não se utilizar o formato JPG, pois utiliza uma técnica de compressão de imagem que pode levar a perda de detalhes e comprometer a extração de atributos da imagem digital (Paciornick, 2000). Um mesmo operador encarregou-se de ambas as tarefas (classificação e digitalização), com o objetivo de uniformizar as etapas de trabalho.

As imagens digitais foram processadas com auxílio do programa computacional SIARCS (Jorge, 1996), para o cálculo da área radicular superficial (cm²) e do comprimento radicular total (m).

3.2.9 Duração dos procedimentos

Em cada data de coleta foram extraídos 28 monólitos por tratamento, perfazendo um total de 336 monólitos amostrados durante todo período experimental.

Foram utilizados 4 operadores para a rotina de lavagem, de forma que a etapa de classificação só iniciou-se após todas as amostras estarem lavadas. As amostras que não foram lavadas no mesmo dia da coleta, foram condicionadas em geladeira de forma a minimizar os processos de respiração e de degradação microbiana das raízes.

A criteriosa rotina de lavagem e separação de cada repetição de 0-0,7 m profundidade (7 monólitos) levou em média 3 horas, seguida de 6 horas para a classificação das raízes por diâmetro, gastas por cada operador. Da mesma forma, as etapas subseqüentes foram estruturadas de modo a aumentar a velocidade de processamento das amostras.

A duração da etapa de espalhamento e digitalização das raízes no scanner também foi computada. Em média foram gastas 2 horas para a digitalização de cada amostra de raiz muito fina da camada 0-0,1 m do solo. Este tempo foi bastante reduzido em todas as outras classes e profundidades, porém a demanda final para cada repetição de 0-0,7 m foi em média de 5 horas. Todos os eixos radiculares foram digitalizados em

todas as frações, sendo efetuados um grande número de imagens por cada monolito processado.

Todo o processo de amostragem, lavagem, classificação por diâmetro e digitalização levou em média 30 dias para cada coleta.

O processamento digital das imagens foi executado manualmente. Todas as análises foram feitas pelo software SIARCS[®] (Embrapa-CNPDIA). Após treinamento e domínio do software, um operador processava em média 200 amostras por dia. Foram processados neste experimento um total de aproximadamente 6.000 imagens.

3.2.10 Delineamento estatístico

O delineamento utilizado para a comparação entre os tratamentos foi o de parcelas subdivididas, sendo as coletas consideradas como sub-parcelas dentro de cada tratamento. Entretanto, no experimento não foram efetuadas repetições experimentais de cada tratamento, ou seja, as repetições foram consideradas como cada parede da trincheira aberta dentro da parcela.

Desta forma, foi utilizado o modelo experimental hierárquico através do programa MSTAT (1991) (ou *nested design*, Neter et al., 1990), que tem sido utilizado por outros autores para análise de variância em estudos de raízes (Dawson et al., 2003). Neste modelo cada nível de um determinado fator (no caso as coletas) ocorre exclusivamente dentro de um nível de outro fator (no caso os tratamentos). Apesar das coletas terem sido simultâneas nos diferentes tratamentos, as repetições de cada coleta foram efetuadas na mesma parcela, e o erro de cada coleta é dependente do tratamento. Desta forma, é possível comparar as médias gerais dos tratamentos, e comparar coletas dentro de cada tratamento, mas não é possível comparar diferentes tratamentos dentro da mesma coleta.

A Tabela 2 apresenta um exemplo de análise de variância, com valores reais do experimento, comparando-se o modelo completamente casualizado com sub-parcelas e o modelo hierárquico. No modelo completamente casualizado, o QM de tratamento é testado contra o QM do erro A, e o QM da coleta e da interação são testados contra o erro B. No modelo hierárquico, a SQ de col d/trat equivale ao somatório da SQ de coleta e da interação col x trat do modelo completamente casualizado, e a SQ do erro equivale ao somatório da SQ do erro A e do erro B. Desta forma, o QM de tratamento é testado contra o QM de col d/trat, e o QM de col d/trat testado contra o QM do erro (Neter et al. 1990). Este modelo é mais rigoroso em sua análise para detectar diferenças entre tratamentos, que o modelo completamente casualizado

Tabela 2. Comparação da análise de variância utilizando-se o modelo completamente casualizado e o modelo hierárquico para os dados de área radicular total na profundidade de 0-0,1 m.

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F calculado
Modelo completamente casualizado				
Tratamento	2	1205937	602969	14.25
Erro A	9	380750	42306	
Coleta	3	1922928	640976	12.12
Trat x col	6	927090	154515	2.92
Erro B	27	1427572	52873	
Modelo hierárquico				
Tratamento	2	1205937	602969	1.90
Col d/trat	9	2850018	316669	6.30
Erro	36	1808322	50231	

3.2.11 Apresentação dos dados

Os valores quantificados foram expressos por unidade de volume de solo extraído, sendo apresentados como densidade da área (DRA), do comprimento (DRC) e da massa seca radicular total (DMR), expressas em $\text{cm}^2 \text{dm}^{-3}$, m dm^{-3} e g dm^{-3} , respectivamente (Van Noordwijk, 1993; Oliveira et al., 2000; Brasil et al., 2002).

Os dados de densidade radicular foram ajustados a uma função exponencial decrescente, da forma: $DR = a * \exp(-b * z)$, onde a = parâmetro de ajuste, b = taxa de decréscimo relativo da DR (m^{-1}) e z = profundidade (m) (Gerwitz & Page, 1974; Nicoullaud et al., 1994), com o objetivo de se estudar a distribuição vertical das raízes em profundidade. Foram ajustadas as funções para cada classe de diâmetro, assim como para os valores totais, usando-se os valores médios de quatro repetições. Para efeito de cálculo, cada camada foi representada pelo seu valor médio (Ex: 0 – 0,1 m; $z = 0,05$ m).

Para uma análise comparativa entre os diferentes tratamentos, foram utilizados como indicadores da espessura ou do diâmetro radicular, os valores da área e do comprimento específico, obtido pela razão entre a área ou o comprimento e a massa radicular, respectivamente ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ e m g^{-1} de raízes) (Fitter, 1996; Oliveira et al., 2000).

Adicionalmente, foram expressos os valores por unidade de superfície ocupada pela pastagem, considerando-se a somatória dos valores entre 0-0,7 m de profundidade e a projeção da área superficial do monolito ($0,01 \text{ m}^2$) utilizado na coletada das amostras.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Variabilidade da densidade radicular

A análise de variância dos resultados demonstrou diferenças estatísticas significativas nas médias da densidade do comprimento, da área e da massa seca radicular total e nas diferentes classes de diâmetro. Estas diferenças foram detectadas em alguns casos entre tratamentos, e em outros, entre as épocas de amostragem, demonstrando que os métodos de renovação da parte aérea e as variações temporais promoveram alterações significativas na dinâmica do crescimento radicular.

Com o objetivo de sintetizar os resultados da variabilidade dos dados de raízes, e como não foram mantidos os mesmo padrões de variação em função das épocas avaliadas, a seguir, tomando como exemplo a primeira amostragem (fevereiro), são apresentados os valores dos coeficientes de variação, para a densidade do comprimento e da massa seca radicular (Tabelas 3 e 4, respectivamente).

De forma geral, pode-se destacar que a variabilidade do comprimento total foi significativamente baixa (Tabela 3) quando comparados com os resultados de CV apresentados para raízes de pastagens (van Noordwijk et al., 1985; Bengough et al., 2000). Estes valores variaram de forma significativa em função dos tratamentos e das classes de diâmetro estudadas. Os valores de CV oscilaram de 17 a 25% no tratamento queimado, independente da profundidade amostrada. Estes valores foram similares aos da roçada, que apenas apresentou uma maior variabilidade na profundidade 0,4 m (Tabela 3). A testemunha apresentou a maior variabilidade do comprimento total, sendo que os valores de CV aumentaram em função da profundidade, alcançando um valor médio de 60%.

A variabilidade dos dados do comprimento em função das classes de diâmetros demonstrou os menores valores de CV quase sempre relativos à fração muito fina das raízes, embora esta fração tenha apresentado sua maior variabilidade também na testemunha (Tabela 3). Com efeito, as frações de diâmetro médias e grossas das raízes foram as que apresentaram os maiores valores de CV, com um aumento significativo desta variação em função da profundidade, principalmente a partir da profundidade 0,4 m. Este efeito foi maior no tratamento queimado, onde foram encontrados coeficientes de até 200%, sendo que na profundidade 0,4 m não foi encontrado nenhum eixo radicular da fração grossa (>2 mm) neste tratamento.

Tabela 3. Coeficientes de variação dos valores da densidade do comprimento radicular (m de raízes dm^3 de solo) por classe de diâmetro de uma pastagem de *Brachiaria humidicola*, na primeira época de avaliação (fevereiro)

Profundidade (m)	CV %				Total
	Grossa	Média	Fina	Muito Fina	
			Testemunha		
0-0,1	38	18	13	36	32
0,1-0,2	44	45	74	26	26
0,2-0,3	66	43	73	89	79
0,3-0,4	82	44	25	57	49
0,4-0,5	144	69	60	68	62
0,5-0,6	115	83	46	70	63
0,6-0,7	142	108	43	74	67
			Queimada		
0-0,1	40	30	30	18	19
0,1-0,2	61	20	18	17	16
0,2-0,3	172	108	17	17	17
0,3-0,4	-	99	17	26	24
0,4-0,5	200	129	56	21	24
0,5-0,6	200	133	19	20	17
0,6-0,7	200	200	68	32	25
			Roçada		
0-0,1	63	46	53	21	21
0,1-0,2	33	14	42	26	19
0,2-0,3	86	64	71	39	28
0,3-0,4	37	172	35	11	55
0,4-0,5	120	59	38	21	12
0,5-0,6	200	84	22	44	21
0,6-0,7	120	94	70	13	9

Resultados similares foram obtidos para a variabilidade espacial da densidade da massa seca radicular (Tabela 4). Os valores de CV tenderam a ser ligeiramente superior na massa seca total do que no comprimento radicular total, sendo que em média estes valores foram menores que 30%.

Houve um aumento dos valores de CV nas classes de maior diâmetro, porém de menor magnitude que o aumento verificado do comprimento.

Tabela 4. Coeficiente de variação dos valores da densidade da massa radicular (m de raízes dm^{-3} de solo) por classe de diâmetro de uma pastagem de *Brachiaria humidicola*, na primeira época de avaliação (fevereiro).

Profundidade (m)	CV %				
	Grossa	Média	Fina	Muito Fina	Total
	Testemunha				
0-0,1	35	25	12	19	14
0,1-0,2	59	53	81	35	33
0,2-0,3	45	40	29	41	17
0,3-0,4	78	20	37	63	46
0,4-0,5	117	111	37	75	69
0,5-0,6	120	74	61	60	56
0,6-0,7	200	86	34	70	59
	Queimada				
0-0,1	49	40	30	20	20
0,1-0,2	48	29	77	25	26
0,2-0,3	171	90	40	38	40
0,3-0,4	0	47	22	49	38
0,4-0,5	200	141	53	20	33
0,5-0,6	200	158	20	30	6
0,6-0,7	200	200	73	43	27
	Roçada				
0-0,1	49	38	28	21	23
0,1-0,2	38	24	10	39	27
0,2-0,3	53	23	28	32	24
0,3-0,4	61	62	34	34	25
0,4-0,5	120	47	26	38	20
0,5-0,6	200	70	32	46	35
0,6-0,7	120	50	20	38	29

3.3.2 Densidade do comprimento radicular total

Para uma melhor compreensão dos resultados, optou-se por apresentá-los de forma separada, agrupando-os em duas camadas (0-0,3 e 0,3-0,7 m), quando necessário, destacando-se os efeitos mais significativos entre épocas e tratamentos.

Na profundidade 0-0,1 m não foram observadas diferenças entre os valores médios da densidade do comprimento radicular total (DCRT) dos três tratamentos, embora estes valores tenham sido 50% maiores no tratamento roçado (T2) que nos demais tratamentos (T0 e T1) (Tabela 5). Na análise da variação temporal, pode-se observar uma redução da DCRT no mês de agosto, na estação seca, da ordem de 69, 40, 60 m dm^{-3} para T1, T2 e T0 respectivamente em relação a fevereiro.

No entanto, enquanto na testemunha houve uma redução contínua na DCRT durante todo o período experimental, na queimada e roçada o comprimento manteve-se

relativamente estável entre fevereiro e junho, com redução significativa em agosto (Tabela 5).

Tabela 5. Efeito da queima e da roçada na densidade do comprimento radicular total (m de raízes dm^{-3} de solo) de uma pastagem de *Brachiaria humidicola*, em função da época de amostragem e à profundidade de 0-0,3 m (valores médios de 4 repetições).

Época	DCRT em m de raízes dm^{-3} de solo		
	Testemunha	Queimada	Roçada
	0-0,1m		
Fevereiro	174 a	123 a	156 ab
Abril	136 ab	114 a	191 a
Junho	114 b	133 a	178 a
Agosto	46 c	54 b	116 b
Média	117 A	106 A	160 A
	0,1-0,2 m		
Fevereiro	62 a	57 a	83 a
Abril	34 a	60 a	70 a
Junho	32 a	62 a	61 a
Agosto	33 a	49 a	65 a
Média	40 B	57AB	70 A
	0,2-0,3 m		
Fevereiro	20,1 a	28,9 a	35,2 a
Abril	24,0 a	40,6 a	26,4 a
Junho	16,3 a	32,9 a	25,5 a
Agosto	16,6 a	35,4 a	25,2 a
Média	19,2 B	34,5 A	28,1 A

Valores seguidos de letras iguais, minúsculas dentro de época e maiúsculas dentro de tratamento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Na profundidade 0,1-0,2 m os resultados revelaram diferenças entre os tratamentos (Tabela 5), onde os valores de DCRT no tratamento roçado foram superiores aos da área testemunha. Embora não tenha sido detectada diferença entre épocas, foi mantido um padrão de distribuição temporal similar que o detectado para a camada superior (0,1 m).

Mesmo não sendo significativo, na profundidade 0,2-0,3 m houve um aumento do comprimento de raízes a partir da 2ª época de avaliação no tratamento queimado, sendo o balanço final da DCRT o único positivo entre os três tratamentos com 5,6 metros dm^{-3} de raízes a mais que o quantificado no mês de fevereiro (Tabela 5). Embora não apresentando diferença estatística, o valor médio de DCRT no T1 foi superior ao da área roçada em 6,4 m, e ambos foram significativamente diferentes da testemunha, que apresentou uma acentuada redução do comprimento radicular nesta camada com valor de DCRT variando de 20,1 para 16,6 m dm^{-3} entre a primeira e a última época de amostragem (Tabela 5).

Tabela 6. Efeito da queima e da roçada na densidade do comprimento radicular total (m de raízes dm^{-3} de solo) de uma pastagem de *Brachiaria humidicola*, em função da época de amostragem e à profundidade de 0,3-0,7 m. (valores médios de 4 repetições).

Época	DCRT em m de raízes dm^{-3} de solo		
	Testemunha	Queimada	Roçada
		0,3-0,4 m	
Fevereiro	16,6 a	19,1 a	21,6 a
Abril	15,8 a	22,8 a	10,8 a
Junho	11,0 a	24,4 a	12,1 a
Agosto	10,0 a	25,2 a	14,4 a
Média	13,4 B	22,9 A	14,7 B
		0,4-0,5 m	
Fevereiro	11,3 a	12,7 a	9,4 a
Abril	8,5 a	17,8 a	6,0 a
Junho	8,7 a	16,9 a	5,5 a
Agosto	5,4 a	15,8 a	4,8 a
Média	8,5 B	15,8 A	6,4 B
		0,5-0,6 m	
Fevereiro	7,11 a	7,85 a	6,98 a
Abril	4,13 a	10,84 a	3,41 a
Junho	4,77 a	6,77 a	4,23 a
Agosto	3,90 a	10,38 a	3,64 a
Média	4,98 B	8,96 A	4,56 B
		0,6-0,7 m	
Fevereiro	4,85 a	4,87 a	5,97 a
Abril	2,97 a	5,84 a	2,55 b
Junho	2,44 a	4,50 a	2,29 b
Agosto	3,12 a	5,05 a	3,14 b
Média	3,34 A	5,07 A	3,49 A

Valores seguidos de letras iguais, minúsculas dentro de época e maiúsculas dentro de tratamento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A partir de 0,3 m de profundidade ocorreu um aumento significativo do comprimento radicular no tratamento queimada (Tabela 6), sendo este mais acentuado abaixo de 0,4 m de profundidade e a partir do mês de abril (final da estação das águas). Nesta mesma profundidade, houve um declínio no tempo nos valores de DCRT na área roçada, onde foram mantidos valores de comprimento muito próximos aos da testemunha. O aumento da DCRT no tratamento queimado foi sempre próximo a dobro dos valores dos demais tratamentos, sendo que para a profundidade 0,4-0,5 este incremento foi quase três vezes o valor da área roçada.

De forma global, estes resultados demonstram que a gramínea no tratamento roçado, manteve uma maior densidade do comprimento das raízes na camada superficial

do solo (0-0,2 m; Tabela 5), com valores da DCRT superiores a 100 m dm^{-3} em todas as épocas avaliadas, sem no entanto, investir em uma expansão radicular em profundidade. Entretanto, o tratamento queimado apresentou um padrão inverso de distribuição do comprimento radicular no perfil, promovendo um aprofundamento da densidade das raízes, principalmente nos meses da estação seca, no horizonte sub-superficial (Tabela 6). A testemunha, tendeu a reduzir o seu comprimento radicular no tempo de forma mais acentuada que os demais tratamentos.

Estas variações foram detectadas também na análise da distribuição percentual da DCRT ao longo do perfil, e são apresentadas a seguir para ajudar na compreensão dos resultados.

Observou-se nos primeiros 0-0,2 m, uma concentração do comprimento radicular na área roçada e na testemunha superior a 75 %, sendo esta contribuição percentual inferior na área queimada (64%) (Tabela 7). As diferenças entre épocas foram mais acentuadas na queimada, refletindo as alterações no padrão de distribuição que foram destacadas anteriormente, sendo que no mês de agosto apenas 53% do comprimento das raízes se encontrava à superfície neste tratamento. Nas três primeiras épocas, a testemunha manteve uma grande proporção da DCRT na superfície, o que deve ter contribuído para a concentração de 67 % do comprimento radicular na camada 0-0,2 m no final da estação seca. Os valores percentuais na superfície aumentaram na roçada entre épocas, chegando a contribuir com 84% de todo o comprimento radicular no mês de abril, tendo seu perfil de enraizamento concentrado 2,85% mais comprimento no mês de agosto do que no início do período experimental durante o verão (Tabela 7).

Tabela 7. Percentual da densidade do comprimento radicular de *Brachiaria humidicola* em função da profundidade 0-0,2 m e 0,3-0,7 m no perfil de enraizamento entre épocas e tratamentos.

Época	(%) na profundidade 0-0,3 m		
	Testemunha	Queimada	Roçada
Fevereiro	80	71	75
Abril	75	67	84
Junho	77	70	83
Agosto	67	53	78
Média	76	64	80
Época	(%) na profundidade 0,3-0,7m		
	Testemunha	Queimada	Roçada
Fevereiro	20	29	25
Abril	25	33	16
Junho	23	30	17
Agosto	33	47	22
Média	24	36	20

Em média estes resultados são bastante similares aos descritos por Brasil (2001). Evans (1978) constatou que mais de 81% do comprimento total do *Lolium perene* se encontrava aos 0,2 m de profundidade. Oliveira (1988), trabalhando com diferentes gramíneas temperadas, verificou que independente das espécies em média de 80 a 96% do comprimento radicular total se encontrava na camada 0,24 m do solo, sendo que a profundidade máxima de enraizamento também foi de 0,7 m.

De outra forma, o valor percentual da DCRT na camada 0,3-0,7 m no tratamento queimado foi de 47% na estação seca, o que comprova um aumento da expansão

radicular em profundidade, superior aos dos demais tratamentos, sobretudo ao do roçado (Tabela 7).

A distribuição vertical da DCRT desta pastagem apresentou um decréscimo gradual com a profundidade (z) em todos os tratamentos. Este declínio configurou um padrão de enraizamento, que em todos os casos foi bem descrito pela função exponencial decrescente ajustada, com valores de R^2 sempre superiores a 0,90.

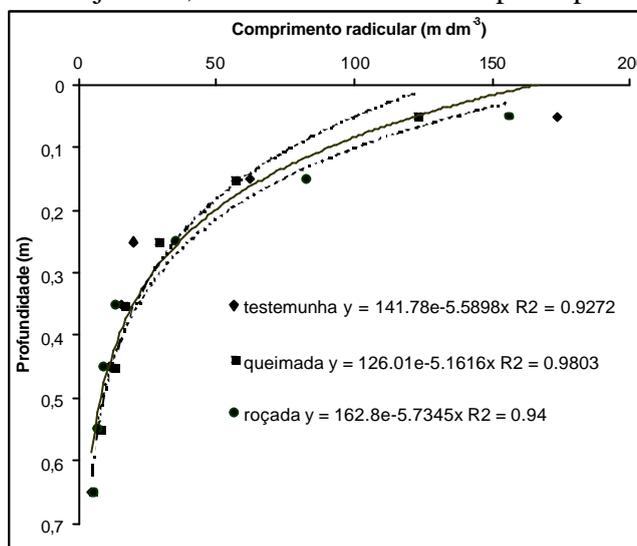


Figura 4. Distribuição vertical da densidade do comprimento radicular total ($m\ dm^{-3}$) na 1ª época de amostragem (fevereiro). (valores médios de 4 repetições).

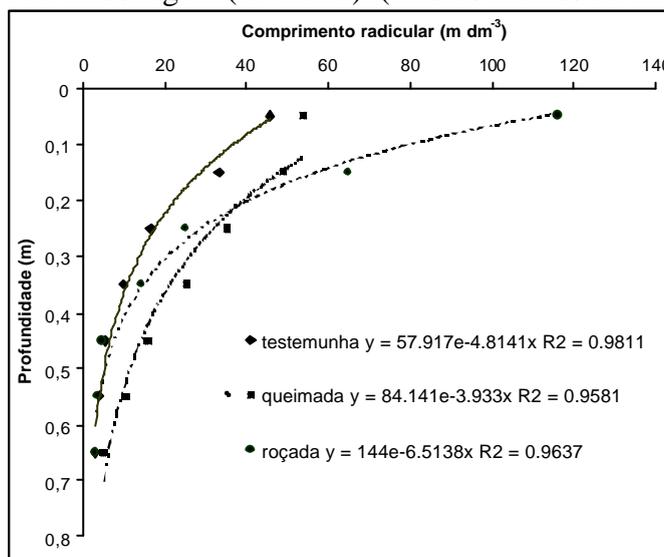


Figura 5. Distribuição vertical da densidade do comprimento radicular total ($m\ dm^{-3}$) na 4ª época de amostragem (agosto). (valores médios de 4 repetições).

Estes resultados confirmam os encontrados por Brasil (2001) para *Brachiaria humidicola*. Diferentes autores propõem esta função para a distribuição vertical das raízes em solos sem camadas de impedimento (Gerwitz & Page, 1974; Nicoullaud et al., 1994; van Noordwijk e Gein, 1996).

Na figura 5, pode-se evidenciar de forma mais representativa, o aumento do comprimento radicular a partir de 0,3 m, e uma redução na camada 0-0,2 m no tratamento queimado, gerando uma alteração significativa nos padrões de distribuição vertical revelado na primeira coleta (Figura 4). A DCRT do tratamento roçada se destaca das demais na camada superior do solo (0-0,2 m), por não ter sofrido uma

grande redução desta característica quando comparado com os demais tratamentos (Figura 5).

São apresentados na Tabela 8, os resultados das variações temporais da densidade do comprimento radicular, e o balanço final desta característica em função dos diferentes tratamentos, expressos por unidade de superfície do solo.

Tabela 8. Variações temporais da densidade do comprimento radicular (km de raízes m^{-2} de solo) de uma pastagem de *Brachiaria humidicola* sob três formas de manejo, por unidade de superfície do solo, à profundidade de 0-0,7m.

Época	km de raízes m^{-2} de solo 0- 0,7m		
	Testemunha	Queimada	Roçada
Fevereiro	29,60	25,34	31,82
Abril	22,54	29,63	31,02
Junho	18,92	28,05	28,86
Agosto	11,80	19,48	23,22
Média	20,72	25,63	28,73
Balanço final no período de agosto - fevereiro	-17,80	-5,89	-8,50

* valores calculados pela área superficial do monólito $0,01 m^2$

Estes resultados refletem de forma global, as alterações da dinâmica temporal do comprimento radicular desta pastagem em função dos tratamentos empregados.

No tratamento roçado, embora tenham sido observados os maiores valores do comprimento radicular na média geral, foi observada uma redução desta característica nos meses de junho e agosto, o que colaborou para a manutenção de um balanço final mais negativo que o da área queimada. Na queimada o sistema radicular da pastagem apresentou um incremento da DCRT obtendo a menor redução desta característica. A testemunha, que não recebeu nenhum tratamento de renovação da parte aérea, apresentou uma queda constante e significativa dos valores de DCRT durante o período experimental, apresentando um balanço negativo de $-17,8 Km m^{-2}$.

3.3.3 Densidade do comprimento radicular por classe de diâmetro

Na Tabela 9, são apresentados os valores da densidade do comprimento radicular (DCR) por classes de diâmetro na profundidade 0-0,1 m do solo, para as diferentes épocas de amostragem e sob efeito dos três tratamentos. Entre os tratamentos e épocas, as frações grossas e médias não apresentaram diferenças significativas, embora os valores sempre tenham sido maiores no tratamento roçado. A variação temporal da fração raízes finas nesta profundidade não foi significativa, porém, os tratamentos promoveram diferenças estatísticas, sendo que a roçada apresentou valores 95 e 45 % superiores à queimada e à testemunha, respectivamente (Tabela 9).

)

Tabela 9. Efeito da queima e da roçada na densidade do comprimento radicular (m de raízes dm^{-3} de solo) por classes de diâmetro de uma pastagem de *Brachiaria humidicola*, em função da época de amostragem e à profundidade de 0-0,1 m (valores médios de 4 repetições)

DCR (m de raízes dm^{-3} de solo) na profundidade 0 – 0,1 m			
Época	Testemunha	Queimada	Roçada
Raízes grossas			
Fevereiro	1,27 a	1,53 a	1,99 a
Abril	1,92 a	2,01 a	1,07 a
Junho	7,56 a	1,65 a	1,63 a
Agosto	0,69 a	0,87 a	1,23 a
Média	2,86 A	1,52 A	1,48 A
Raízes médias			
Fevereiro	5,34 a	5,69 a	7,54 a
Abril	5,31 a	5,13 a	4,92 a
Junho	4,32 a	2,65 a	7,73 a
Agosto	2,61 a	2,04 a	5,55 a
Média	4,39 A	3,88 A	6,43 A
Raízes finas			
Fevereiro	9,14 a	7,45 a	14,46 a
Abril	9,05 a	8,33 a	8,80 a
Junho	9,43 a	5,76 a	12,93 a
Agosto	7,15 a	4,22 a	14,15 a
Média	8,69 B	6,44 B	12,58 A
Raízes muito finas			
Fevereiro	158 a	108 a	132 ab
Abril	120 ab	99 ab	176 a
Junho	93 b	123 a	156 a
Agosto	35 c	47 b	95 b
Média	101 A	94 A	140 A

Valores seguidos de letras iguais, minúsculas dentro de época e maiúsculas dentro de tratamento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

As raízes muito finas ($< 0,8$ mm) reduziram-se significativamente no período de fevereiro a agosto em todos os tratamentos. Na área queimada e na roçada foi observada uma tendência ao aumento da DCR em abril e junho, no início e meio da estação seca. Este incremento foi da ordem de 24 m dm^{-3} para T1, demonstrando um aumento desta fração durante o período seco. Os valores de DCR para o tratamento roçada apresentaram esta resposta a partir da segunda época, com valores de 77 e 57 m dm^{-3} respectivamente superiores aos T1 e T0. Na testemunha não foi constatado este aumento da DCR de raízes finas na estação seca, sendo demonstrada uma progressiva redução da densidade do comprimento radicular ao longo do período avaliado (Tabela 9).

A maior alteração na morfologia das raízes muito finas, na profundidade 0,1m ocorreu no período de junho-agosto. Com reduções da ordem de 76, 61 e 58 m dm^{-3} para T1, T2 e testemunha respectivamente. Embora a testemunha tenha mantido esta menor redução do comprimento na fração muito fina, o valor de DCR final neste

tratamento foi o menor encontrado (35 m dm^{-3}), em resultado as diferenças evidenciadas abril-junho. Não foi detectada diferença entre os tratamentos, o que também foi constatado de forma similar na análise dos valores totais (Tabela 5) para esta profundidade 0,1 m. A DCR das raízes finas e muito finas foi sempre maior na área roçada em comparação aos demais tratamentos, sendo o valor de DCR final de T2 de 2 a 3 vezes superior aos da queimada e da testemunha em agosto (Tabela 9). Este resultado, que já foi revelado pela DCRT, demonstra que durante o período de estudo o efeito da desfolha mecânica, estimulou uma maior concentração das frações raiz fina e muito fina em superfície, com valores de DCR superiores nesta profundidade, quando comparado com a ação do fogo e a testemunha sem remoção da parte aérea.

Na camada 0,1-0,2 m (Tabela 10), os valores de DCR também foram maiores para o tratamento roçado. Foram observadas diferenças significativas entre épocas nas raízes grossas na roçada e raízes médias na queimada, o que não foi constatado na testemunha. As raízes finas apresentaram diferenças significativas nesta profundidade apenas no tratamento roçado. As raízes muito finas não foram sensíveis aos efeitos do manejo da parte aérea nesta camada, sendo que na queimada e na roçada os valores de DCR não foram significativamente diferentes. A redução do comprimento de raízes muito finas ocorreu de forma contínua na testemunha em todas épocas, de forma similar ao verificado na camada 0-0,1 m, sendo esta redução de 27 m dm^{-3} entre os meses de fevereiro a agosto (Tabela 10).

Tabela 10. Efeito da queima e da roçada na densidade do comprimento radicular (m de raízes dm⁻³ de solo) por classes de diâmetro de uma pastagem de *Brachiaria humidicola*, em função da época de amostragem e à profundidade de 0,1-0,2 m (valores médios de 4 repetições)

	Testemunha	Queimada	Roçada
Raízes grossas			
Fevereiro	1,05 a	0,62 a	1,32 ab
Abril	0,59 a	0,87 a	0,62 b
Junho	0,80 a	1,09 a	2,03 a
Agosto	0,82 a	0,59 a	0,47 b
Média	0,81 A	0,79 A	1,11 A
Raízes médias			
Fevereiro	3,46 a	2,82 a	3,41 a
Abril	1,74 a	1,94 ab	1,84 a
Junho	2,59 a	1,39 ab	2,59 a
Agosto	2,35 a	0,75 b	2,99 a
Média	2,53 A	1,72 A	2,71 A
Raízes finas			
Fevereiro	5,50 a	3,50 a	8,75 a
Abril	2,79 a	3,05 a	3,12 b
Junho	4,41 a	3,62 a	5,18 ab
Agosto	4,81 a	2,00 a	9,49 a
Média	4,38 A	3,04 A	6,64 A
Raízes muito finas			
Fevereiro	52 a	50 a	69 a
Abril	29 a	54 a	64 a
Junho	24 a	56 a	51 a
Agosto	25 a	46 a	52 a
Média	33 B	51AB	59A

Valores seguidos de letras iguais, minúsculas dentro de época e maiúsculas dentro de tratamento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

Estes resultados sugerem que a resposta à rebrota, não obstante o método de renovação da pastagem, está ocorrendo na fração mais fina das raízes, de forma contrária ao que vem acontecendo com o padrão de distribuição da testemunha.

Tabela 11. Efeito da queima e da roçada na densidade do comprimento radicular (m de raízes dm⁻³ de solo) por classes de diâmetro de uma pastagem de *Brachiaria humidicola*, em função da época de amostragem e à profundidade de 0,2-0,3 m (valores médios de 4 repetições).

Época	Comprimento (m de raízes dm ⁻³ de solo) em 0,2-0,3 m		
	Testemunha	Queimada	Roçada
Raízes Grossas			
Fevereiro	0,62a	0,21a	1,16a
Abril	0,53a	0,40a	0,67a
Junho	0,20a	0,58a	1,08a
Agosto	0,55a	0,40a	0,83a
Média	0,47 B	0,40 B	0,93 A
Raízes finas			
Fevereiro	2,28 a	2,33 a	3,79ab
Abril	1,88 a	2,77 a	1,68 b
Junho	1,55 a	1,59 a	2,21 b
Agosto	1,85 a	1,54 a	5,62 a
Média	1,89 A	2,05 A	3,32 A
Raízes muito finas			
Fevereiro	16,3a	25,6a	28,1a
Abril	20,8a	36,3a	23,1a
Junho	13,5a	30,0a	20,9a
Agosto	13,1a	33,2a	17,6a
Média	15,9B	31,3A	22,4B

Valores seguidos de letras iguais, minúsculas dentro de época e maiúsculas dentro de tratamento, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05)

Na profundidade 0,2-0,3 m as raízes grossas e muito finas, apresentaram diferenças significativas entre tratamentos, sendo que apenas as raízes finas foram responsivas às variações temporais (Tabela 11). A média da fração grossa de T2 foi maior que o dobro da dos demais tratamentos. Na queima o valor de DCR das raízes muito finas foi significativamente superior aos demais em todas as épocas de avaliação nesta profundidade. De fato, a fração raízes muito finas foi a que melhor refletiu as variações temporais nos diferentes tratamentos.

Tabela 12. Efeito da queima e da roçada na densidade do comprimento radicular (m de raízes dm^{-3} de solo) por classes de diâmetro de uma pastagem de *Brachiaria humidicola*, em função da época de amostragem e à profundidade de 0,3-0,7 m (valores médios de 4 repetições)

Época	comprimento (m de raízes dm^{-3} de solo) profundidade 0,3-0,7 m		
	Testemunha	Queimada	Roçada
Raízes muito finas 0,3-0,4 m			
Fevereiro	13,8 a	16,6 a	12,8 a
Abril	13,3 a	20,5 a	8,5 a
Junho	8,9 a	21,9 a	8,4 a
Agosto	7,5 a	23,5 a	10,9 a
Média	10,9B	20,6A	10,1B
0,4-0,5 m			
Fevereiro	9,2 a	11,2 a	7,1 a
Abril	6,5 a	15,1 a	5,0 a
Junho	7,0 a	14,4 a	4,0 a
Agosto	4,1 a	14,5 a	3,4 a
Média	6,6 B	13,8 A	4,9 B
0,5-0,6 m			
Fevereiro	6,14 a	6,85 a	4,67 a
Abril	3,10 a	9,00 a	2,65 a
Junho	3,5 a	5,44 a	2,91 a
Agosto	3,12 a	8,77 a	2,41 a
Média	3,96 B	7,51 A	3,16 B
0,6-0,7			
Fevereiro	3,90 a	4,21 a	4,08 a
Abril	2,19ab	4,46 a	2,03 ab
Junho	1,47 b	3,22 a	1,47 b
Agosto	2,66ab	4,10 a	2,12 ab
Média	2,55 A	4,02 A	2,42 A

Valores seguidos de letras iguais, minúsculas dentro de época e maiúsculas dentro de tratamento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Na Tabela 12, são apresentados de forma resumida apenas os resultados que comparam a densidade radicular da fração raízes muito finas nas profundidades 0,3-0,7 m. A partir de 0,3 m de profundidade, confirmando o ocorrido com os valores da DCRT, na área queimada foram observados os maiores valores de DCR da fração muito fina em todas as profundidades avaliadas, demonstrando ter havido um efeito neste tratamento alterando o padrão de distribuição das raízes. Esta fração contribuiu em média com mais de 86% do comprimento total do sistema radicular da *Brachiaria humidicola* na profundidade 0-0,3 m (Tabela 13).

Tabela 13. Contribuição percentual da fração raízes muito finas à densidade do comprimento radicular total de *Brachiaria humidicola* na profundidade 0,1-0,3 m.

Época	% raízes muito finas		
	Testemunha	Queimada	Roçada
		0-0,1m	
Fevereiro	91	88	85
Abril	88	87	92
Junho	82	92	88
Agosto	76	87	82
Média	86	89	88
		0,1-0,2 m	
Fevereiro	84	87	83
Abril	85	90	91
Junho	75	90	84
Agosto	76	94	80
Média	83	89	84
		0,2-0,3 m	
Fevereiro	81	89	80
Abril	87	89	88
Junho	83	91	82
Agosto	79	94	70
Média	82	91	80

A contribuição percentual desta classe de diâmetro (muito fina) foi maior na área queimada, principalmente nos meses da estação seca (julho-agosto), atingindo valores de contribuição acima de 90 % no comprimento total. No tratamento roçado houve uma redução da contribuição percentual de raízes muito finas neste mesmo período, e em profundidade, chegando a contribuir com apenas 69,84% no mês de agosto na profundidade 0,2-0,3m para a DCRT (Tabela 13).

Na Tabela 14, são apresentados os valores da contribuição desta mesma fração ao total do comprimento radicular para a profundidade 0,3-0,7 m

Tabela 14. Contribuição percentual da fração raízes muito finas a densidade do comprimento do radicular total de *Brachiaria humidicola* na profundidade 0,3-0,7 m.

Época	% raízes muito finas		
	Testemunha	Queimada	Roçada
		0,3-0,4m	
Fevereiro	83	87	59
Abril	84	90	79
Junho	81	90	69
Agosto	75	93	76
Média	81	90	69
		0,4-0,5 m	
Fevereiro	81	88	76
Abril	76	85	83
Junho	80	85	73
Agosto	76	92	71
Média	78	87	77
		0,5-0,6 m	
Fevereiro	86	87	67
Abril	75	83	78
Junho	73	80	69
Agosto	80	84	66
Média	80	84	69
		0,6-0,7 m	
Fevereiro	80	86	68
Abril	74	76	80
Junho	60	72	64
Agosto	85	81	68
Média	76	79	69

Estes resultados demonstram que houve uma menor proporção de raízes muito finas no sistema radicular da pastagem no tratamento roçado na profundidade 0,3-0,7 m, e conseqüentemente, um aumento da proporção de raízes de maior diâmetro nas camadas mais profundas do solo. O tratamento queimado sempre manteve a maior contribuição das raízes muito finas na densidade do comprimento radicular total, confirmando o que foi discutido no item anterior. Devido à magnitude desta fração no comprimento total, esta classe foi a que melhor revelou os efeitos dos tratamentos e da variação temporal do sistema radicular (Tabela 14).

Na Tabela 15, são apresentados os resultados da distribuição vertical percentual do comprimento das raízes muito finas nas camadas 0-0,3 e 0,3-0,7 m de profundidade.

Tabela 15. Percentual da fração raiz muito fina nas profundidades 0-0,3 e 0,3-0,7 m no perfil de enraizamento entre épocas e tratamentos

Época	(%) da fração muito fina		
	Testemunha	Queimada	Roçada
0-0,3m			
Fevereiro	80,97	71,02	77,98
Abril	76,45	64,19	85,32
Junho	77,29	70,48	84,60
Agosto	66,31	52,52	81,14
Média	75,26	64,55	82,01
0,3-0,7 m			
Fevereiro	19,03	28,98	22,02
Abril	23,55	35,81	14,68
Junho	22,71	29,52	14,21
Agosto	33,69	47,48	19,86
Média	24,74	35,45	17,69

Estes resultados confirmam o que foi constatado para a densidade do comprimento total, onde em média a fração raízes muito finas, esteve concentrada na superfície, com valores oscilando de 64,55% na área queimada e 75% na testemunha. No tratamento roçado, em média mais de 80% desta fração esteve concentrada na profundidade 0-0,3 m.

Os padrões de distribuição vertical foram alterados pela variabilidade temporal e pelos tratamentos efetuados, demonstrando que na área queimada o investimento na manutenção de raízes com diâmetro inferior a 0,8 mm passou de aproximadamente 30% para quase 50% durante a estação seca, nas profundidades abaixo de 0,3 m, enquanto esta proporção tendeu a ser significativamente menor na área roçada. A testemunha também apresentou um aumento desta contribuição durante o inverno, chegando a investir mais de 33% de suas raízes muito finas em profundidade (Tabela 15).

Estes resultados das raízes muito finas, em conjunto com os observados nas Tabelas 13 e 14, demonstram que as raízes com diâmetro maior que 1,4 mm (médias e grossas) contribuíram com apenas uma pequena fração do comprimento radicular total na camada superficial do solo, porém tenderam a aumentar relativamente a sua participação com a profundidade.

As Figuras 6 e 7 ilustram o padrão de distribuição vertical da DCR das raízes, tomando como exemplo às 1ª e 4ª épocas de coleta do tratamento roçado.

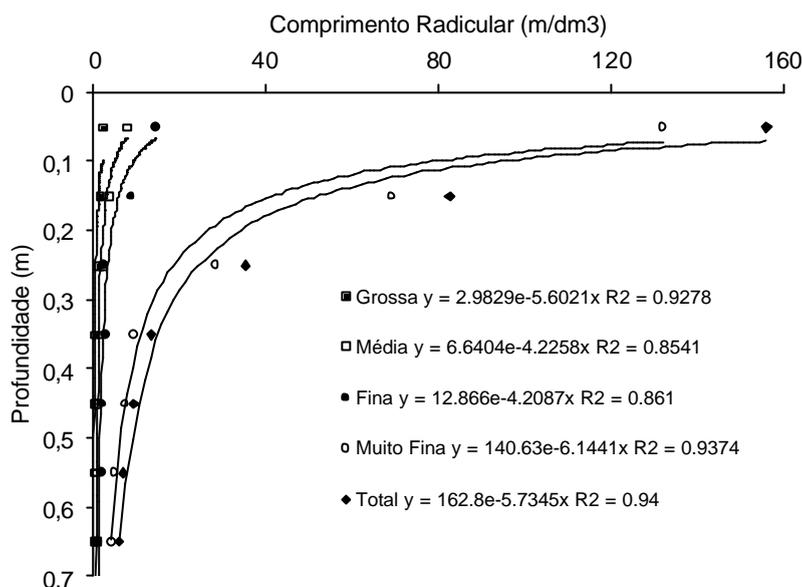


Figura 6. Distribuição vertical da densidade do comprimento radicular ($m\ dm^{-3}$) por diferentes classes de diâmetro (1ª coleta em fevereiro, área roçada).

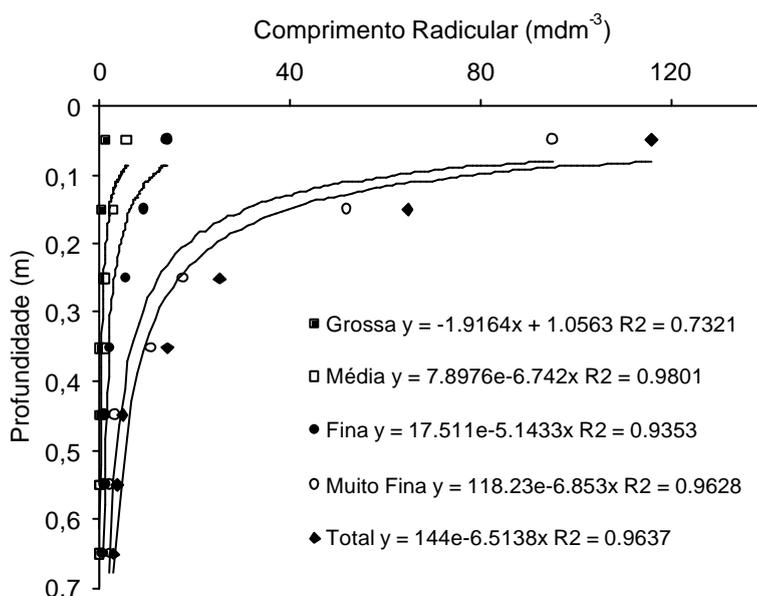


Figura 7. Distribuição vertical da densidade do comprimento radicular ($m\ dm^{-3}$) por diferentes classes de diâmetro (4ª coleta em agosto, área roçada).

Adicionalmente, as figuras 8 e 9 representam o padrão de distribuição vertical da DCR das raízes, das 1ª e 4ª épocas de coleta do tratamento queimado. Verifica-se de forma clara, que em ambos os tratamentos, houve uma tendência ao decréscimo gradual da densidade radicular do comprimento com a profundidade por todas as classes de diâmetro, seguindo um padrão similar ao da distribuição da DCR total.

Entretanto, no tratamento queimado os valores da DCR na fração mais grossa promoveram os piores ajustes da função exponencial decrescente, com destaque para redução na concentração de raízes na profundidade de 0,2m neste tratamento, se comparada à mesma concentração no tratamento roçado.

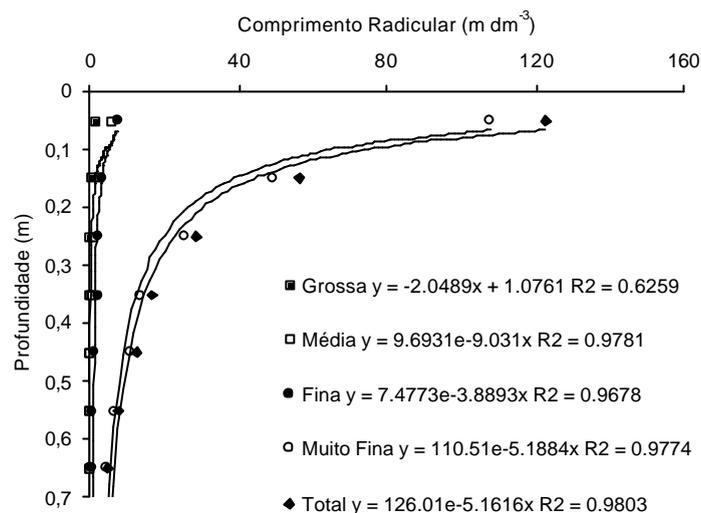


Figura 8. Distribuição vertical da DCR (m dm^{-3}) por diferentes classes de diâmetro (4ª coleta em fevereiro, área queimada). (valores médios de 4 repetições).

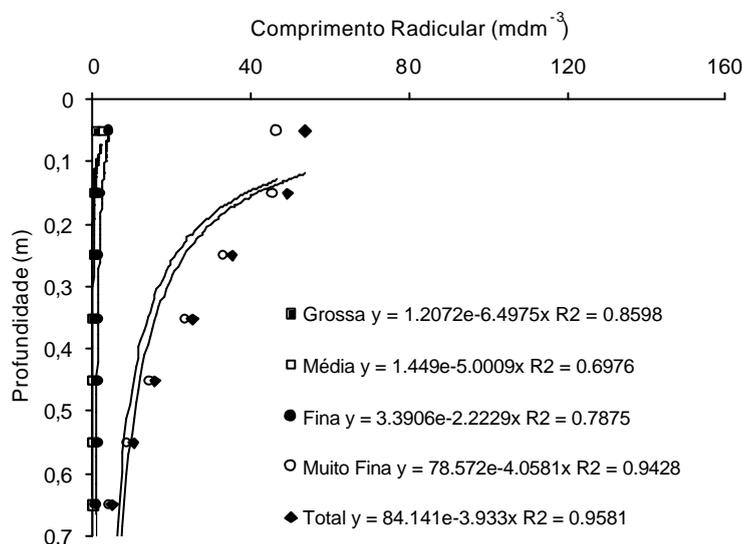


Figura 9. Distribuição vertical da DCR (m dm^{-3}) por diferentes classes de diâmetro (4ª coleta em Agosto, tratamento Queimada). (valores médios de 4 repetições).

O padrão de distribuição vertical da DCR da fração muito fina foi praticamente o mesmo observado para DCRT, devido aos elevados valores percentuais de sua contribuição no comprimento total das raízes (Tabela 15; Figuras 8 e 9).

Os resultados observados para a densidade da área radicular ($\text{cm}^2 \text{ dm}^{-3}$), seguiram as mesmas tendências de variação que os encontrados para o comprimento, tanto no que tange aos efeitos dos tratamentos quanto às variações temporais, desta forma optou-se por apresentá-los no anexo do trabalho.

3.3.4 Densidade da massa seca radicular total

Os resultados do efeito dos tratamentos de desfolha nos valores da densidade da massa seca radicular total (DMRT) em g dm^{-3} , nas diferentes épocas na camada de 0-0,3 m, são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16. Efeito da queima e da roçada na densidade da massa seca radicular total (g de raízes dm⁻³ de solo) de uma pastagem de *Brachiaria humidicola*, em função da época de amostragem e à profundidade de 0-0,3 m (valores médios de 4 repetições)

Época	Massa (g de raízes dm ⁻³ de solo)		
	Testemunha	Queimada	Roçada
		0-0,1m	
Fevereiro	7,25 a	4,66 a	5,52 a
Abril	6,09 a	5,82 a	6,03 a
Junho	6,44 a	4,78 a	6,15 a
Agosto	3,72 b	3,90 a	6,66 a
Média	5,87 A	4,79 A	6,09 A
		0,1-0,2 m	
Fevereiro	2,93 a	2,69 a	3,53 a
Abril	2,14 a	2,75 a	2,69 a
Junho	2,03 a	2,26 a	2,88 a
Agosto	2,26 a	2,03 a	3,73 a
Média	2,34B	2,43AB	3,20A
		0,2-0,3 m	
Fevereiro	1,128 a	1,185 a	1,418 a
Abril	1,105 a	1,452 a	1,248 a
Junho	0,808 a	0,980 a	1,160 a
Agosto	0,872 a	1,110 a	1,407 a
Média	0,978 A	1,182 A	1,308 A

Valores seguidos de letras iguais, minúsculas dentro de época e maiúsculas dentro de tratamento, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05)

O valor médio da DMRT na camada 0-0,1 m foi maior no tratamento roçado, sendo a maior diferença de 1,3 g comparado ao tratamento com queimada. Embora não atingindo significância estatística, a roçada apresentou valores crescentes de massa seca de raízes durante o período estudado, sendo o maior valor (6,66 g dm⁻³) em agosto. Este padrão temporal foi contrário ao encontrado para a densidade do comprimento (Tabela 4), onde houve uma queda evidente da DCRT neste mesmo tratamento, conforme já discutido anteriormente. Isto demonstra ter havido um incremento em massa de raízes na camada superficial ao longo da estação seca, o que não ocorreu com os demais tratamentos. A variação temporal da massa seca na testemunha foi significativa, sendo que na última época o valor de DMRT foi quase a metade da quantificada em fevereiro

Os valores de DMRT da camada 0,1-0,2 m revelam a mesma tendência de aumento da massa na área roçada, com superioridade estatística sobre a testemunha. O tratamento com queimada continuou apresentando uma ligeira redução deste valor em função da época, porém em média foi superior a testemunha (Tabela 16).

Na profundidade 0,2-0,3 m, estas tendências foram mantidas para T2, porém a testemunha apresentou uma menor DMRT no período de seca, sendo que houve um pequeno investimento em massa nesta profundidade no período de junho-agosto em T1 (Tabela 16).

Os valores referentes às profundidades 0,3-0,7 m são apresentados na Tabela 17. Pode-se verificar, que a partir de 0,3 m, de conformidade com o que ocorreu para o comprimento total das raízes (Tabela 5), os maiores valores de densidade de massa seca foram observados na pastagem queimada, com maior reflexo em profundidade. No tratamento roçado abaixo dos 0,4m de profundidade todos os valores de DMRT foram inferiores ao da área queimada, e quase sempre ao da testemunha. Cabe destacar ainda, que os valores de massa seca na queimada apresentam-se próximos do dobro dos demais. Foram observados diferentes padrões de variação temporal entre os tratamentos, sendo que a roçada e a testemunha apresentaram uma clara tendência a sofrer reduções da massa seca no período seco (junho-agosto). Já na área queimada, este período foi o de maior investimento em massa radicular nestas profundidades.

Tabela 17. Efeito da queima e da roçada na densidade da massa seca radicular total (g de raízes dm⁻³ de solo) de uma pastagem de *Brachiaria humidicola*, em função da época de amostragem e à profundidade de 0,3-0,7 m (valores médios de 4 repetições).

Época	massa (g de raízes dm ⁻³ de solo)		
	Testemunha	Queimada	Roçada
		0,3-0,4 m	
Fevereiro	0,777 a	0,595 a	0,800 a
Abril	0,757 a	0,715 a	0,612 a
Junho	0,465 a	0,940 a	0,485 a
Agosto	0,462 a	0,730 a	0,683 a
Média	0,616 A	0,745 A	0,645 A
		0,4-0,5 m	
Fevereiro	0,355 a	0,357 a	0,395 a
Abril	0,365 a	0,483 a	0,250 a
Junho	0,320 a	0,452 a	0,247 a
Agosto	0,248 a	0,492 a	0,210 a
Média	0,322 AB	0,446 A	0,276B
		0,5-0,6 m	
Fevereiro	0,245 a	0,280 a	0,260 a
Abril	0,212 a	0,350 a	0,125 a
Junho	0,205 a	0,240 a	0,185 a
Agosto	0,155 a	0,343 a	0,145 a
Média	0,204 AB	0,303 A	0,179 B
		0,6-0,7 m	
Fevereiro	0,225 a	0,163 a	0,232 a
Abril	0,157ab	0,227 a	0,093 b
Junho	0,120ab	0,152 a	0,100 b
Agosto	0,090b	0,197 a	0,130ab
Média	0,148 A	0,185 A	0,139 A

Valores seguidos de letras iguais, minúsculas dentro de época e maiúsculas dentro de tratamento, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

Na Tabela 18, observa-se nos primeiros 0-0,3 m do perfil, uma concentração da massa seca radicular, na área roçada e na testemunha superior a 78 %. O sistema radicular da área queimada concentrou aproximadamente 9% menos massa radicular

nesta camada (69,50%). Este padrão foi similar ao encontrado para o comprimento radicular (Tabela 4), onde as diferenças entre épocas foram mais acentuadas na queimada, refletindo as alterações no padrão de distribuição que já foram discutidas.

Tabela 18. Percentual da densidade da massa seca radicular de *Brachiaria humidicola* nas profundidades 0-0,3 e 0,3-0,7 m no perfil de enraizamento entre épocas e tratamentos

Época	(%) 0-0,3 m		
	Testemunha	Queimada	Roçada
Fevereiro	79	74	74
Abril	76	65	79
Junho	82	72	81
Agosto	77	67	80
Média	78	70	79
	(%) 0,3-0,7m		
	Testemunha	Queimada	Roçada
Fevereiro	21	26	26
Abril	24	35	21
Junho	18	28	19
Agosto	23	33	20
Média	22	30	22

Na profundidade 0-0,3 m os valores percentuais na superfície aumentaram na roçada entre épocas, chegando a contribuir com 80,11% de toda a massa radicular no mês de agosto, tendo seu perfil de enraizamento concentrado 6,31% mais massa seca radicular neste mesmo mês do que no início do período experimental no verão. Na profundidade 0,3-0,7 m destacam-se os elevados valores percentuais da DMRT em profundidade no tratamento queimado com uma contribuição de 32,61% na estação seca, que foi superior aos dos demais tratamentos, sobretudo quando comparado com o roçado, que concentrou menos de 20 % de toda a massa de raízes abaixo de 0,3 m durante a época seca (Tabela 18).

Estes resultados são apresentados de forma complementar nas figuras 10 e 11, com as distribuições verticais da DMR na camada 0-0,7 m na 1ª e 4ª épocas de amostragem.

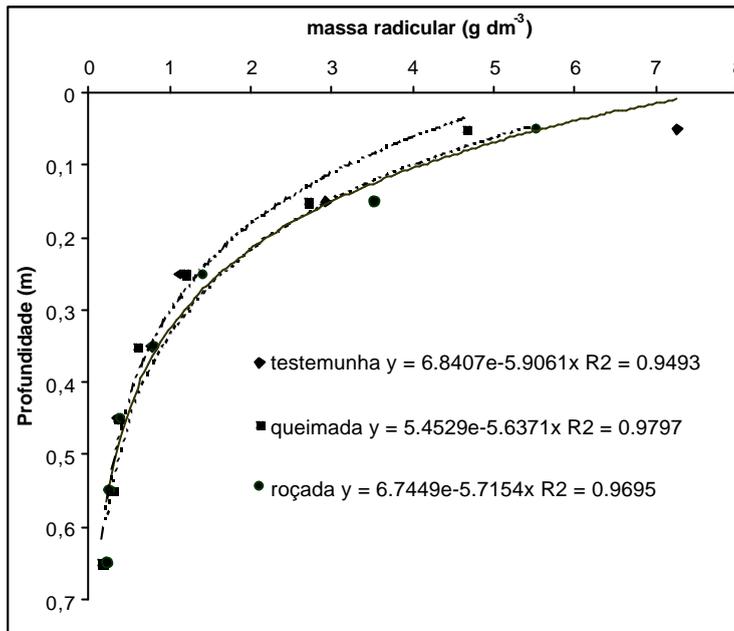


Figura 10. Distribuição vertical da densidade da massa seca radicular (g dm⁻³) do total das classes na 1ª época de amostragem (fevereiro) na camada de 0-0,7 m. (valores médios de 4 repetições).

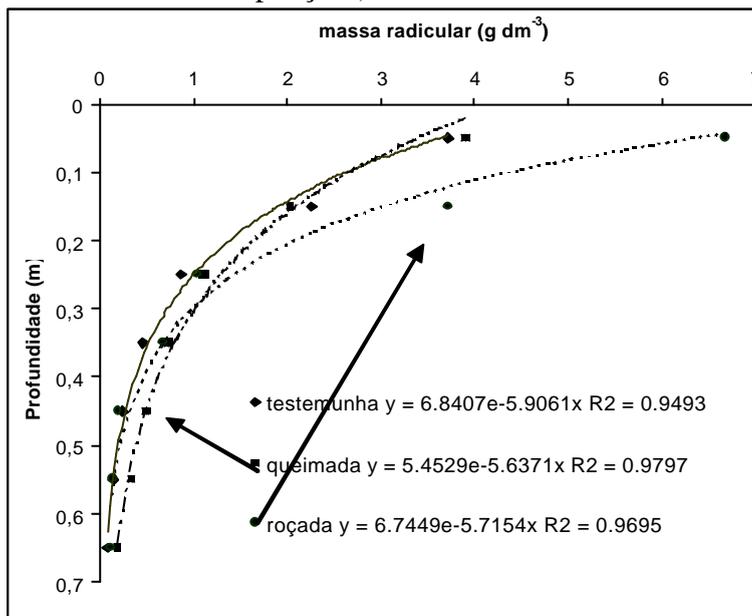


Figura 11. Distribuição vertical da densidade da massa seca radicular (g dm⁻³) do total das classes na 4ª época de amostragem (agosto) na camada de 0-0,7 m. (valores médios de 4 repetições).

A distribuição vertical da densidade da massa seca radicular do tratamento roçada se destaca das demais na camada superior do solo (0,2 m), por ter aumentado este valor ao longo das épocas quando comparado com os demais tratamentos. Nesta mesma camada pode-se observar uma redução significativa da DMSR total na testemunha, por ter este tratamento apresentado o maior valor de massa seca inicial (Figura 10). Na área queimada se destaca na figura 11, o incremento da massa de raízes a partir de 0,3 m.

Os resultados das variações temporais da densidade da massa seca radicular, e o balanço final desta característica em função dos diferentes tratamentos, foram

calculados por unidade de superfície, e estão apresentados na Tabela 19. Estes resultados refletem de forma global, as alterações da dinâmica temporal da massa de raízes na pastagem em função dos tratamentos empregados.

O tratamento roçado apresentou em média um valor ligeiramente superior de DMSR total. Porém o maior valor de DMSR foi encontrado no mês de abril para o tratamento queimado, com 1,323 kg de raízes m^{-2} da pastagem. Tanto a testemunha como a queimada, demonstraram uma clara redução destes valores nos meses de junho-agosto, sendo que na testemunha em agosto, esta redução foi mais acentuada refletindo um balanço final mais negativo que o da área queimada. Na pastagem queimada ocorreu um aumento da DMSR em abril, obtendo um balanço ligeiramente negativo mesmo com as reduções do período de seca.

Tabela 19. Variações temporais da densidade da massa seca radicular (kg m^{-2} de solo) de uma Pastagem de *Brachiaria humidicola* sob três formas de manejo (valores referentes a profundidade 0,7m).

Época	Kg de raízes m^{-2} de solo em 0,7 m		
	Testemunha	Queimada	Roçada
Fevereiro	1,291	0,993	1,216
Abril	1,083	1,323	1,105
Junho	1,039	0,980	1,121
Agosto	0,781	0,880	1,297
Média	1,049	1,044	1,185
Balanço no período agosto e fevereiro *	-0,510	-0,113	+0,081

z*valores calculados pela área superficial do monólito 0,01 m^2

O tratamento roçado foi o único que obteve um balanço final ligeiramente positivo, demonstrando que a pastagem investiu mais em massa, porém concentrando a maior parte de suas raízes na superfície (Tabela 19).

3.3.5 Densidade da massa seca radicular por classe de diâmetro

Os valores da densidade da massa seca radicular por classes de diâmetro na profundidade 0-0,1 m do solo, nas diferentes épocas de amostragem e sob efeito dos três tratamentos, são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20. Efeito da queima e da roçada na densidade da massa seca radicular total (g de raízes dm⁻³ de solo) por classe de diâmetro de uma pastagem de *Brachiaria humidicola*, em função da época de amostragem e à profundidade de 0-0,1 m (valores médios de 4 repetições).

Época	massa (g de raízes dm ⁻³ de solo) 0 – 0,1 m		
	testemunha	queimada	roçada
Raízes grossas			
Fevereiro	0,46 ab	0,48 ab	0,58 a
Abril	0,82 a	0,86 a	0,45 a
Junho	0,91 a	0,40 ab	0,52 a
Agosto	0,30 b	0,34 b	0,55 a
Média	0,62 A	0,52 A	0,52 A
Raízes médias			
Fevereiro	1,11 a	1,15 a	1,13 a
Abril	1,32 a	1,32 a	1,40 a
Junho	1,59 a	0,66 a	1,52 a
Agosto	0,83 a	0,66 a	1,63 a
Média	1,21 A	0,94 A	1,42 A
Raízes finas			
Fevereiro	0,85 b	0,58 a	0,95 b
Abril	1,18 ab	0,84 a	1,20 ab
Junho	1,62 a	0,69 a	1,12 ab
Agosto	1,06 ab	0,69 a	1,81 a
Média	1,18 A	0,70 A	1,27 A
Raízes muito finas			
Fevereiro	4,82 a	2,44 a	2,87 a
Abril	2,77 a	2,80 a	2,99 a
Junho	2,32 a	3,03 a	3,00 a
Agosto	1,53 a	2,24 a	2,68 a
Média	2,86 A	2,62 A	2,88 A

Valores seguidos de letras iguais, minúsculas dentro de época e maiúsculas dentro de tratamento, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05).

Nesta profundidade (0-0,1 m), a fração raízes grossas apresentou diferenças significativas entre épocas nos tratamentos com queima e na testemunha, sendo a massa destes dois tratamentos bastante aumentada nos meses de abril e junho. A proporção desta classe de diâmetro contribuiu em média com 10% da massa seca total (Tabela 21). As raízes médias contribuiriam com 20% na massa seca total, sendo sua maior contribuição verificada no tratamento roçada durante os meses de junho e agosto.

A densidade da fração raízes finas na profundidade 0-0,1m, aumentou de forma significativa na roçada e na testemunha em função da época, sendo que o valor final da massa seca desta classe foi o dobro da inicial para a testemunha. É importante destacar, que o percentual desta fração foi bastante significativo para estes dois tratamentos (Tabela 23), chegando na época seca a 27 e 28 % respectivamente para T2 e T0. Estes

resultados demonstram que na área roçada o aumento da massa total na profundidade 0-0,1 m, como verificado anteriormente (Tabela 17), foi devido a uma maior contribuição das frações de maior diâmetro na densidade da massa seca total.

A densidade da massa seca radicular da fração muito fina não apresentou diferenças entre tratamentos e entre épocas. Porém, pode-se destacar que houve um aumento da massa nos meses abril e junho em T1 e T2, que chegaram a valores muito próximos, porém só foi refletida em termos percentuais no tratamento queimada (Tabela 21). A seguir a este incremento, em ambos os tratamentos ocorreu uma considerável redução da DMSR no mês de agosto.

A maior proporção de massa radicular muito fina foi mantida sempre no tratamento queimado, com um valor médio 10% superior, quando comparado com os demais tratamentos (Tabela 21). Na testemunha os valores de DMR das raízes muito finas sofreram um declínio progressivo em função do tempo, sendo esta redução da ordem de $3,29 \text{ g dm}^{-3}$, obtendo uma densidade final de apenas $1,53 \text{ g dm}^{-3}$ (Tabela 20). Neste mesmo tratamento, no mês de junho a fração muito fina contribuiu com apenas com 36% da massa seca total. Com efeito, a massa de raízes da fração muito fina foi reduzida no mês de agosto para todos os tratamentos, o que contribuiu para o aumento das demais classes de diâmetro neste período (Tabela 21).

Tabela 21. Contribuição percentual das diferentes classes de diâmetro a densidade massa seca radicular total (g de raízes dm⁻³ de solo) em função da época de amostragem e do tratamento, à profundidade de 0-0,1m.

Época	% das frações em 0 – 0,1 m		
	Testemunha	Queimada	Roçada
% Raízes Grossas			
Fevereiro	6	10	11
Abril	13	15	7
Junho	14	8	8
Agosto	8	9	8
Média	11	11	9
% Raízes médias			
Fevereiro	15	25	20
Abril	22	23	23
Junho	25	14	25
Agosto	23	17	24
Média	21	20	23
% Raízes finas			
Fevereiro	12	12	17
Abril	19	14	20
Junho	25	14	18
Agosto	28	18	27
Média	21	15	21
% Raízes muito finas			
Fevereiro	66	52	52
Abril	45	48	50
Junho	36	63	49
Agosto	41	57	40
Média	47	55	48

Tabela 22. Efeito da queima e da roçada na densidade da massa seca de raízes muito finas (g de raízes dm⁻³ de solo) de uma pastagem de *Brachiaria humidicola*, em função da época de amostragem e à profundidade de 0,1-0,2 m (valores médios de 4 repetições).

Época	massa (g de raízes dm ⁻³ de solo) em 0,1-0,2 m		
	Testemunha	Queimada	Roçada
Raízes muito finas			
Fevereiro	1,37	1,38	2,11
Abril	1,10	1,65	1,64
Junho	0,88	1,44	1,43
Agosto	1,11	1,40	1,79
Média	1,11B	1,47AB	1,74A

Valores seguidos de letras iguais, minúsculas dentro de época e maiúsculas dentro de tratamento, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05).

Na profundidade 0,1-0,2 m (Tabela 22), a única diferença observada foi para os efeitos dos tratamentos sobre a fração muito fina das raízes. Foram observados valores de DMSR maiores para o tratamento roçado, embora não havendo diferença estatística contra os valores da área queimada.

Na camada 0,2-0,3 foram observadas diferenças significativas para as frações médias, finas e muito finas (Tabela 23).

Tabela 23. Efeito da queima e da roçada na densidade da massa seca radicular (g de raízes dm^{-3} de solo) por classe de diâmetro, de uma pastagem de *Brachiaria humidicola*, em função da época de amostragem e à profundidade de 0,2-0,3 m (valores médios de 4 repetições)

Época	massa (g de raízes dm^{-3} de solo) 0,2-0,3 m		
	Testemunha	Queimada	Roçada
Raízes médias			
Fevereiro	0,225 a	0,120 a	0,270 a
Abril	0,152 a	0,205 a	0,205 a
Junho	0,188 a	0,163 a	0,200 a
Agosto	0,205 a	0,080 a	0,288 a
Média	0,193AB	0,142B	0,241A
Raízes finas			
Fevereiro	0,223 a	0,168 a	0,180 b
Abril	0,190 a	0,200 a	0,188 b
Junho	0,147 a	0,132 a	0,253 b
Agosto	0,165 a	0,152 a	0,425 a
Média	0,181 A	0,163 A	0,261 A
Raízes muito finas			
Fevereiro	0,533 a	0,852 a	0,815 a
Abril	0,570 a	0,960 a	0,662 a
Junho	0,430 a	0,610 a	0,588 a
Agosto	0,390 a	0,790 a	0,563 a
Média	0,481B	0,803A	0,657AB

Valores seguidos de letras iguais, minúsculas dentro de época, e maiúsculas dentro de tratamento, não diferem entre si pelo teste de tukey ($p < 0,05$).

Estes resultados demonstram que a pastagem roçada apresentou na profundidade 0,2-0,3 m um menor incremento de raízes de menor diâmetro, principalmente no mês de agosto, onde em um intervalo de dois meses pode-se verificar um aumento de quase 100% na massa seca de raízes finas, embora isto não tenha sido observado nenhuma outra vez nas demais profundidades estudadas (Tabela 23).

A partir desta profundidade (0,3 m), os valores da DMRS das raízes muito finas da pastagem queimada foram sempre superiores aos dos demais tratamentos (Tabela 24).

Tabela 24. Efeito da queima e da roçada na densidade da massa seca de raízes muito finas (g de raízes dm⁻³ de solo) de uma pastagem de *Brachiaria humidicola*, em função da época de amostragem e à profundidade de 0,3-0,7 m (valores médios de 4 repetições).

Época	massa (g de raízes dm ⁻³ de solo) em 0,3– 0,7m		
	Testemunha	Queimada	Roçada
0,3-0,4 m			
Fevereiro	0,427 a	0,448 a	0,490 a
Abril	0,425 a	0,478 a	0,320 a
Junho	0,280 a	0,605 a	0,245 a
Agosto	0,220 a	0,565 a	0,325 a
Média	0,338 A	0,524 A	0,345 A
0,4-0,5 m			
Fevereiro	0,177 a	0,270 a	0,213 a
Abril	0,155 a	0,308 a	0,143 a
Junho	0,185 a	0,290 a	0,107 a
Agosto	0,135 a	0,360 a	0,098 a
Média	0,163B	0,307A	0,140B
0,5-0,6 m			
Fevereiro	0,152 a	0,153 a	0,132 a
Abril	0,090 a	0,192 a	0,053 a
Junho	0,110 a	0,142 a	0,065 a
Agosto	0,090 a	0,223 a	0,065 a
Média	0,111AB	0,178A	0,079B
0,6-0,7 m			
Fevereiro	0,115 a	0,123 a	0,133 a
Abril	0,067 a	0,120 a	0,058ab
Junho	0,040 a	0,078 a	0,032 b
Agosto	0,060 a	0,128 a	0,042 b
Média	0,071 A	0,112 A	0,066 A

Valores seguidos de letras iguais, minúsculas dentro de época e maiúsculas dentro de tratamento, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

Estes dados demonstraram que a DMR da fração muito fina seguiu a mesma tendência que a densidade da massa seca radicular total, sendo observado um grande investimento da pastagem queimada na massa de raízes muito finas em profundidade. Este resultado concorda com o obtido anteriormente para o comprimento e a massa total.

Na Tabela 25 são apresentados os valores proporcionais da contribuição desta fração (< 0,8mm) para a densidade da massa seca total.

Tabela 25. Contribuição percentual das raízes muito finas a densidade massa seca radicular total (g de raízes dm⁻³ de solo) em função da época de amostragem e do tratamento, à profundidade de 0,3-0,7 m.

Época	massa (g de raízes dm ³ de solo) em 0,3– 0,7m		
	Testemunha	Queimada	Roçada
% 0,3-0,4 m			
Fevereiro	55	75	61
Abril	56	67	52
Junho	60	64	51
Agosto	48	77	48
Média	55	71	53
% 0,4-0,5 m			
Fevereiro	50	76	54
Abril	42	64	57
Junho	58	64	43
Agosto	54	73	47
Média	51	69	50
% 0,5-0,6 m			
Fevereiro	62	55	51
Abril	42	55	42
Junho	54	59	35
Agosto	58	65	54
Média	54	58	46
% 0,6-0,7 m			
Fevereiro	51	75	57
Abril	43	53	62
Junho	33	51	32
Agosto	67	65	32
Média	48	61	46

Em concordância com o exposto anteriormente, na área queimada houve um aumento desta fração em profundidade, com proporções maiores ou iguais a 51%, não obstante terem sido verificados valores acima de 70% várias vezes.

Os valores percentuais desta classe na queimada foram superiores a esta contribuição para os demais tratamentos. Sedo que esta fração contribuiu com apenas 32 % da massa seca total na profundidade 0,7 m no mês de junho no tratamento roçado.

3.3.6 Comprimento radicular específico

O padrão de variação temporal e os efeitos dos tratamentos sob as características morfológicas também foram estudados pelo comprimento específico, em m g⁻¹ de raízes (Fitter, 1996). Este valor nos dá uma estimativa do diâmetro médio das raízes e da intensidade de ramificação do sistema radicular. Estas variações para as profundidades 0-0,3 m são apresentadas na Tabela 26.

Tabela 26. Variações temporais do comprimento radicular específico (m g^{-1} de raízes) de uma pastagem de *Brachiaria humidicola* sob três formas de manejo (valores referentes as profundidades 0-0,3 m).

Época	m g^{-1} de raízes em 0 – 0,3 m		
	Testemunha	Queimada	Roçada
0-0,1m			
Fevereiro	24,00	26,39	28,26
Abril	22,33	19,59	31,67
Junho	17,70	27,82	28,94
Agosto	12,37	13,85	17,42
Média	19,10	21,91	26,57
0,1-0,2 m			
Fevereiro	21,16	21,19	23,51
Abril	15,89	21,82	26,02
Junho	15,76	27,43	21,18
Agosto	14,60	24,14	17,43
Média	16,85	23,65	22,04
0,2-0,3 m			
Fevereiro	17,82	24,39	24,82
Abril	21,72	27,96	21,15
Junho	20,17	33,62	21,98
Agosto	19,04	31,89	17,91
Média	19,69	29,47	21,47

O reflexo das alterações da massa e do comprimento (discutidos anteriormente), revelou valores de comprimento específico significativamente diferentes no tempo e entre tratamentos, demonstrando alteração no padrão morfológico das raízes.

Na profundidade 0-0,1 m o sistema radicular da pastagem queimada apresentou um aumento desta relação no mês de junho, enquanto que a testemunha tendeu a manter raízes de maior diâmetro em todas as épocas. Em média a pastagem roçada manteve um sistema radicular com 5 m g^{-1} a mais que os demais tratamentos, o que comprova a produção de raízes mais finas na camada superficial do solo durante todo o período experimental.

Na profundidade 0,1-0,2 m os maiores valores de comprimento específico foram observados na área queimada sobretudo nos meses de junho e agosto, demonstrando uma predominância de raízes mais finas nesta camada durante o período seco. Pelo contrário, nesta mesma época, houve um aumento significativo da contribuição percentual em massa das raízes de maior diâmetro na testemunha e na roçada (Tabela 26), com valor aproximado de 6 m g^{-1} menor que a queimada. A testemunha manteve os menores valores em todos os períodos, sendo que a partir de abril manteve seu sistema radicular em média com apenas 15 m g^{-1} , com quase o dobro de diferença no mês de agosto que a queimada.

Estes resultados demonstram que o tratamento de queima alterou de forma significativa o padrão morfológico das raízes da gramínea na profundidade 0,1-0,3 m,

promovendo aumento de raízes de menor diâmetro, principalmente em resposta às condicionantes edafo-climáticas do período seco.

Os resultados do comprimento específico nas profundidades de 0,3-0,7 m, são apresentados na Tabela 27. Estes resultados demonstram que a mesma tendência de maiores valores de comprimento específico foi mantida na pastagem queimada durante o período seco, porém, os valores mais contrastantes foram encontrados entre 0,3 e 0,6 metros de profundidade, onde esta pastagem concentrou suas raízes mais finas.

Os valores de comprimento específico da testemunha tenderam a ser maiores que o da roçada principalmente em profundidade durante o período de escassez de água. Isto sugere que a testemunha, embora com valores significativamente menores de comprimento e massa total que a queimada, manteve suas raízes de menor diâmetro em maior profundidade, destacando o valor de 34,67 m g¹ alcançado na camada 0,6-0,7 m no mês de agosto.

Na pastagem roçada, foi mantido um mesmo padrão morfológico em todas as épocas sem destaque para nenhuma das profundidades, não obstante já ter revelado os baixos valores e DCRT e DMRT a partir de 0,3 m de profundidade (Tabela 27).

Tabela 27. Variações temporais do comprimento radicular específico (m g^{-1} de raízes) de uma Pastagem de *Brachiaria humidicola* sob três formas de manejo (valores referentes as profundidades 0,3- 0,7 m).

Época	m g^{-1} de raízes em 0,3 – 0,7 m		
	Testemunha	Queimada	Roçada
	0,3-0,4m		
Fevereiro	21,36	32,10	27
Abril	20,87	31,89	17,65
Junho	23,66	25,96	24,95
Agosto	21,65	34,52	21,08
Média	21,88	31,12	22,67
	0,4-0,5 m		
Fevereiro	31,83	35,57	23,80
Abril	23,29	36,85	24
Junho	27,19	37,39	22,27
Agosto	21,77	32,11	22,86
Média	26,02	34,48	23,23
	0,5-0,6 m		
Fevereiro	29,02	28,04	26,85
Abril	19,48	30,97	27,28
Junho	23,27	28,21	22,86
Agosto	25,16	30,26	25,10
Média	24,23	29,37	25,52
	0,6-0,7 m		
Fevereiro	21,56	29,88	25,73
Abril	18,92	25,73	27,42
Junho	20,33	29,61	22,90
Agosto	34,67	25,63	24,15
Média	23,87	27,71	25,05

Na Tabela 28, são apresentados os valores de comprimento específico calculados a partir dos valores de comprimento e massa seca total alocados no perfil.

Estes resultados estão de acordo com os determinados anteriormente para cada profundidade, onde os valores totais da camada 0-0,1 m representam mais de 80 % do comprimento e 60% de toda a massa radicular, influenciaram aos maiores valores de comprimento específico nos meses de fevereiro e abril na pastagem roçada. Entretanto no período seco, este padrão não foi mantido, sendo os valores de comprimento específico da pastagem queimada em junho e agosto em média se 5 m g^{-1} de raízes maiores que os valores dos demais tratamentos.

Tabela 28. Variações temporais do comprimento radicular específico (m g^{-1} de raízes) de uma Pastagem de *Brachiaria humidicola* sob três formas de manejo (valores referentes a profundidade 0-0,7m).

Época	m g^{-1} do total de raízes em 0- 0,7m		
	Testemunha	Queimada	Roçada
	m g^{-1} de raízes		
Fevereiro	22,92	25,52	26,19
Abril	20,81	22,39	28,07
Junho	18,21	28,62	25,75
Agosto	15,12	22,14	17,90
Média	19,27	24,67	24,48

Em conjunto, estes resultados sugerem que na área queimada, em função de alterações promovidas pelo fogo nas camadas superficiais, ocorreu um aumento significativo de expansão radicular a partir de 0-0,2 m em profundidade. Esta resposta se deu em função de alterações no padrão morfológico das raízes, com um maior crescimento e produção de raízes muito finas ($< 0,8$ mm), resultante de uma possível estratégia de absorção de água e nutrientes, no período de maior déficit hídrico, pelas condições climáticas do período de seca.

Guenni et al. (2002) estudaram na Venezuela a resposta à seca de cinco diferentes espécies do gênero *Brachiaria* sp., sendo que a *Brachiaria humidicola* e a *Brachiaria dictyoneura* foram as que melhor toleraram stress hídrico, demonstrando que estas espécies diferiram das demais pelo incremento da densidade radicular nas camadas mais profundas do solo ao longo do período seco, o que refletiu em uma maior preservação da umidade nas camadas superiores, e uma maior eficiência no uso da água em profundidade.

De outra forma, Marschner (1995) relatou que o suprimento de nutrientes pode alterar significativamente o crescimento e morfologia das raízes, acrescentando que este efeito é mais marcante para o fornecimento de nitrogênio.

Em adição, Boot & Mensink (1990), citados por Lavres Junior & Monteiro (2003), demonstraram que espécies de forrageiras provenientes de solos com baixa fertilidade, responderam ao baixo suprimento de nitrogênio com um aumento significativo do comprimento radicular total. Lavres Junior & Monteiro (2003) verificaram, trabalhando com capim “mombaça” submetido a doses crescentes de N e K, que as maiores doses destes nutrientes reduziram significativamente o comprimento radicular da gramínea, aumentando a proporção de raízes de maior diâmetro.

As alterações da distribuição da morfologia radicular ao longo do perfil e das estações de crescimento, e as alterações no padrão morfológico (diâmetro) revelados neste trabalho, podem estar revelando uma estratégia adaptativa desta espécie às limitações hídricas e nutricionais do ambiente edáfico, o que pode em parte estar justificando a recomendação do gênero *Brachiaria* sp. para áreas de savanas tropicais em solos ácidos e com períodos prolongados de seca (Lascano, 1991; Rao et al., 1996).

3.4 CONCLUSÕES

O método da trincheira, em conjunto com a extração seqüencial de monólitos, foi suficientemente preciso para detectar alterações no padrão de distribuição vertical e temporal da morfologia radicular de *Brachiaria humidicola* em função dos tratamentos de renovação da parte aérea estudados.

Uma cuidadosa separação das raízes por classes de diâmetro é essencial para os estudos dos efeitos de práticas de manejo da pastagem sobre a distribuição da morfologia do sistema radicular de gramíneas do gênero *Brachiaria* sp.

A testemunha apresentou a maior redução do sistema radicular em todas as profundidades e épocas estudadas, quando comparado com os demais tratamentos, resultante da falta de estímulo de rebrota. O sistema radicular da pastagem neste tratamento demonstrou um maior crescimento das raízes em profundidade por efeito de época.

A roçada promoveu um aumento significativo das raízes da pastagem na camada 0-0,2 m de profundidade, quando comparado com o tratamento queimado e a testemunha. De forma contrária, e comparativamente aos demais tratamentos, a roçada promoveu uma redução significativa da densidade radicular abaixo desta profundidade.

Na área queimada, ocorreu um estímulo à expansão radicular, com um maior crescimento e produção de raízes finas em profundidade, para a absorção de água e nutrientes, durante período seco.

4. CAPÍTULO II

INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE REPETIÇÕES E DE CLASSES DE DIÂMETRO NO ESTUDO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DA MASSA RADICULAR DE PASTAGEM DE *BRACHIARIA* *HUMIDICOLA*: UMA APROXIMAÇÃO PARAMÉTRICA

RESUMO

Numa pastagem de *Brachiaria humidicola* sobre um Planossolo Háptico do Instituto de Zootecnia da UFRRJ, foi conduzido um estudo com o objetivo de determinar o número de amostras necessárias para detectar diferenças entre médias do sistema radicular, utilizando o método do anel volumétrico. Além disso, também se objetivou avaliar a distribuição de classes de diâmetro na massa seca radicular destas amostras. O protocolo de amostragem consistiu em utilizar números variáveis de repetições ao acaso para verificar o grau de variabilidade das medidas das raízes através dos valores do coeficiente de variação das amostras. Os valores do CV% não apresentaram decréscimo significativo com o aumento do número de amostras, obtendo-se valores de 38 e 40 % para as profundidades 0-0,1 e 0,1-0,2 m respectivamente. A partir destes valores reais de CV % foram calculados, por uma fórmula baseada no teste t, os números de amostras necessários para detectar diferenças significativas entre valores de massa radicular. Foi estimado ser necessário 32 repetições para se detectar diferenças de 20 % entre duas médias de massa seca radicular para a profundidade 0-0,1m, para um nível de probabilidade de 5 %. Este valor estimado, foi alterado para a profundidade 0,1-0,2 m em função do maior CV %. Houve uma alocação preferencial de massa radicular nas frações de raízes finas (diâmetro inferior a 0,8 mm), que contribuíram com mais de 60% da massa radicular total na camada de 0-0,2 m de profundidade. Esta proporção não foi alterada em função do aumento do número de repetições, demonstrando estar sendo mantido um mesmo padrão de distribuição da morfologia das raízes na pastagem estudada. Os estudos de variabilidade das características radiculares devem respeitar um protocolo que leve em consideração o coeficiente de variação inerente ao arranjo espacial das raízes em função de sua interação com o ambiente edáfico.

Palavras chave: variabilidade amostral, morfologia radicular, métodos de amostragem.

ABSTRACT

In a *Brachiaria humidicola* pasture in a Planossolo Háplico (Fragiudult) in the Animal Science Institute of UFRRJ, a study was conducted with the objective to determine the number of samples necessary to detect differences between means of the root system, by using the volumetric cylinder method. Additionally, the distribution of root mass of these samples along classes of diameter was evaluated. The sampling protocol consisted in varying the number of replicates at random and to verify degree of variability of root measures through the values of coefficient of variation of the samples. Values of CV% did not present a significant decrease as the number of samples increased, and values of 38 and 40 % for the 0-0.1 and 0.1-0.2 m depth were obtained, respectively. With these actual values of CV %, using a formula based on **t** test, the number of samples necessary to detect significant differences between values of root mass was calculated. It was estimated that 32 replicates were necessary to detect differences of 20 % between two means of root mass in the 0-0.1 m depth, for a probability level of 5 %. This estimated value was changed in the 0.1-0.2 m depth as a function of the higher CV %. There was a preferential allocation of root mass into the fine roots (diameter lower than 0.8 mm), that contributed with more than 60% of the total root mass in the 0-0.2 m layer. This proportion was not changed as the number of replicates increased, demonstrating that a same pattern of root distribution was maintained in the studied pasture area. Studies about the variability of root characteristics should follow a protocol that consider the coefficient of variation intrinsic to the spatial arrangement of roots as regard with their interaction with the edaphic environment

Keywords: root variability, root morphology, sampling methods.

4.1 INTRODUÇÃO

O sistema radicular de espécies forrageiras é, seguramente, o compartimento menos estudado do ecossistema pastoril. O potencial produtivo das pastagens é determinado por fatores relacionados ao clima, ao solo e à espécie envolvida. Dentre estes fatores, o solo pode impor limitações ao crescimento das plantas pela capacidade de supri-las com nutrientes, água e oxigênio. Além disso, muito pouco ainda se conhece dos efeitos das práticas de manejo da parte aérea das pastagens sobre a dinâmica do sistema radicular. Isto ressalta a importância de se conhecer a distribuição espacial das raízes, que possibilita, entre outras determinações, quantificar o acúmulo de carbono em sua biomassa, e por essa via, a realização de estimativas da produtividade primária das comunidades vegetais. O estudo da distribuição radicular, suas funções e interações com a rizosfera, demandam a quantificação de parâmetros como o comprimento e diâmetro das raízes e da área superficial associada (Rossiello et al., 1995; Dowdy et al., 1998).

As pesquisas sobre variabilidade espacial do sistema radicular são importantes nos estudos de modelagem do crescimento radicular e do desenvolvimento global das comunidades vegetais. O principal entrave para tais avaliações é metodológico (Smit, 2000). Não é fácil a escolha de um modelo próprio para o estudo de raízes, devido à variabilidade intrínseca do sistema radicular (Bengough et al., 2000). Aspectos como a anisotropia e fenologia exigem constante refinamento de métodos para aumentar a precisão das técnicas de mensuração do sistema radicular. Van Noordwijk et al. (1985), consideram que, embora muitos estudos tenham testado técnicas de quantificação do sistema radicular, os maiores problemas associados aos estudos de raízes, raramente considerados, são onde e como amostrar, e qual o tamanho ideal de amostragem.

O método mais usado, padrão para determinar a densidade radicular, é o do anel volumétrico. Sua ampla aceitação decorre do fato de ser muito menos destrutivo e da oportunidade de obter-se um elevado número de repetições com um tempo e labor menor, o que pode ser uma vantagem em termos estatísticos. No entanto, um dos problemas críticos deste método é a determinação do número de amostras necessárias para ter diferenças significativas entre médias, em função do coeficiente de variação amostral a um dado nível de probabilidade (Van Noordwijk, 1987). O modelo proposto por van Noordwijk et al. (1985), baseado na estatística paramétrica do teste t, demonstra que os estudos de número de repetições devem considerar as diferenças percentuais entre médias que se quer distinguir entre diferentes tratamentos. Estes estudos assumem a hipótese de independência estatística ou distribuição espacial aleatória dos dados da densidade radicular (Van Noordwijk et al., 1985), sem considerar a existência de correlação das amostras com a distância (Vieira, 2000).

De acordo com Bengough et al. (2000), em pastagens, os coeficientes de variação (CV) associados à quantificação da massa seca com cilindros metálicos, oscilam tipicamente entre 30 e 50%. Entretanto, esses mesmos autores apresentam dados de vários trabalhos, onde os CV variam entre 30 a 100%, independentemente do número de amostras ter variado entre 4 e 100. Assim, a determinação de um número de amostras suficientemente representativas torna-se de suma importância para gerar protocolos confiáveis para os estudos quantitativos sobre a dinâmica radicular.

O objetivo deste trabalho foi determinar, em um estudo exploratório, o número de amostras necessárias para detectar diferenças entre médias, com confiabilidade suficiente para estudos do sistema radicular de *Brachiaria humidicola*, utilizando o método do anel volumétrico. Além disso, também se objetivou avaliar a distribuição de classes de diâmetro na massa seca radicular destas amostras.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Localização

O experimento foi instalado no Setor de Caprinocultura do Instituto de Zootecnia da UFRRJ, em uma área de 1,0ha da pastagem de *Brachiaria humidicola* já descrita nos Capítulos I, e realizado durante o mês de setembro de 2002.

4.2.2 Método de amostragem e processamento das raízes

O protocolo de amostragem utilizado consistiu em utilizar números variáveis de repetições ao acaso para verificar o grau de variabilidade dos dados de raízes. Para tal, nesta área de 1 ha foram realizadas coletas das raízes, com diferentes números de repetições, ou seja, de 4, 8, 16, 32, 64 e 128 repetições, sendo estes números de repetições considerados como fonte de variação.

As raízes foram coletadas com um cilindro metálico de 0,385 dm³ (altura de 0,1 m e diâmetro de 0,07 m) (Oliveira et al., 2000). No laboratório, as raízes foram separadas da massa do solo por decantação-flotação em água corrente, e recuperadas por peneiramento do sobrenadante em uma seqüência de peneiras de 2,0, 1,0 e 0,250 mm, e transferidas para bandejas plásticas.

As raízes recuperadas referentes a todas as repetições foram separadas com uma tesoura, e classificadas com o auxílio de um paquímetro de precisão, em cinco classes de diâmetro (mm) conforme a Tabela 29, para o estudo da distribuição percentual da massa radicular por diâmetro. A escolha destas classes levou em consideração os resultados obtidos por Brasil (2001), e também, por serem as raízes finas as que melhor respondem às variações ambientais (Oliveira, 1988).

Para tal, também foi considerada a proposta de distribuição em três classes (> 0,5 mm; 0,5-1,0 mm e > 1,0 mm) apresentada por Rodrigues & Cadima-Zevallos (1991) em estudo com *Brachiaria humidicola*, e a classificação descrita por McCULLY (1999), onde as raízes finas são consideradas com diâmetro menor que 0,8 mm. Outros trabalhos com o gênero *Brachiaria* sp. apenas consideram raízes finas as com diâmetro menor que 2 mm (Oliveira, 2000), pois utilizam o limite da malha de lavagem (peneira) como fator de separação do diâmetro radicular.

Tabela 29. Classes para a caracterização da distribuição percentual da morfologia radicular por diâmetro.

Classes	Diâmetro (mm)
1	> 1,6
2	1,6-1,0
3	1,0-0,8
4	0,8-0,5
5	< 0,5

Depois de agrupadas em sub-amostras por classe de diâmetro, as raízes foram secas em estufa com circulação de ar (65 °C por 48h), e pesadas em balança com precisão de 0,1 mg, obtendo-se a distribuição percentual e o total da massa seca para cálculo da densidade da massa seca radicular por volume do anel (DMR= g 0,385 dm⁻³). De forma a facilitar as análises e representação dos resultados, os dados não foram transformados para dm³, de forma que a unidade utilizada para representar a densidade radicular foi g anel⁻¹.

4.2.3 Análise estatística dos dados

No estudo do número de amostras requeridas para a avaliação da variabilidade dos dados, inicialmente foi avaliada a homogeneidade das variâncias obtidas com os diferentes números de repetições, através do teste de Bartlett. Em seguida foi efetuada a análise de variância pelo teste F, para um modelo completamente casualizado, cuja matriz foi organizada de forma que o número de repetições foi considerado como fonte de variação.

Para calcular a diferença estatística exigida entre as médias de dois tratamentos, foi utilizada uma adaptação do método requerido para o Teste t (95 % significância), descrito por Bengough et al. (2000), através da fórmula:

$$D = q (CV / r^{1/2})$$

onde **D** é a diferença mínima entre médias de dois tratamentos, **q** é o valor Tabelado em função do número de tratamentos e dos graus de liberdade do resíduo, **CV** o coeficiente de variação, e **r** o número de repetições. O coeficiente de variação utilizado neste cálculo foi o obtido com o maior número de repetições (128) para cada profundidade.

No estudo de caracterização da distribuição morfológica do sistema radicular em diferentes classes de diâmetro (mm), os percentuais das respectivas classes de diâmetro em relação à densidade da massa seca radicular (total de classes) foram calculados. Os valores foram analisados pelo teste F, segundo um delineamento experimental inteiramente casualizado, onde as classes de diâmetro representaram os cinco tratamentos. Foi utilizado o teste de Tukey para se comparar às médias das porcentagens de massa de cada classe em relação à massa total, para cada profundidade.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Número de repetições

Os valores médios de densidade da massa seca radicular total expressos por dm^3 ($\text{g anel}^{-1} \times 2,6$) foram da ordem de 4,8 e 2,93 g para as profundidades de 0-0,1 e 0,1-0,2 m, respectivamente.

A análise fornecida pelo teste de Bartlett demonstrou homogeneidade das variâncias para os diferentes números de repetições, indicando que a variância da massa seca radicular não variou com o aumento do número de repetições.

Na análise da variância, não foram encontradas diferenças significativas nas médias da densidade da massa seca radicular entre os diferentes números de repetições, o que demonstra que mesmo variando o número de amostras de 4 a 128, não houve alteração significativa dos valores médios da massa de raízes obtida pelo método do anel volumétrico. Todavia não foi possível observar um padrão definido de distribuição do CV em torno das médias. Os menores valores de CV foram encontrados no menor número de repetições (4) em ambas as profundidades, e a partir de 32 amostras coletadas houve uma tendência à estabilização deste valor em torno de aproximadamente 40% em ambas as profundidades (Tabela 30).

De forma geral, houve um sensível aumento do CV para as profundidades 0,1-0,2m, exceto para 8 repetições, onde foi obtido o maior valor de CV na profundidade 0-0,1m. Van Noordwijk et al. (1985), estimaram um CV de 40% em pastagens utilizando um amostrador de mesmo volume que o utilizado neste trabalho ($0,385 \text{ dm}^3$), onde valores de CV acima de 100% foram bastante comuns. Estes dados demonstram que esta variação pode estar associada, ou ser inerente ao próprio arranjo espacial do sistema radicular (anisotropia) e de sua interação com as propriedades edáficas do local estudado (Steen, 1984; van Noordwijk, 1987). Estes resultados são similares aos obtidos por Bengough et al. (2000), onde em pastagens, os CV para a massa seca radicular (obtida com cilindros metálicos) oscilaram tipicamente entre 30 e 50%, independente do número de amostras ter variado entre 4 e 100. Entretanto, outros autores sugerem um número de repetições variando apenas de 3 a 10 amostras por tratamento ou unidade experimental (Oliveira et al., 2000), embora a maior parte das pesquisas com sistema radicular utiliza um número arbitrário de 4 repetições como sendo suficiente para atender às necessidades de análise pela estatística paramétrica.

Como o fator mais importante em amostragens com cilindros volumétricos no campo é o diâmetro do cilindro (Bohm, 1979), já que este determina o limite de variabilidade que pode ser detectada, também podemos sugerir que parte desta variação esteja relacionada com a capacidade de recuperação do sistema radicular pelo método de amostragem, que pode estar limitando a recuperação das raízes em escalas maiores que o seu diâmetro. Em um trabalho realizado nesta mesma pastagem, Stafanato et al. (2002) observaram que o método do monolito recuperou aproximadamente 32 % mais massa radicular do que o anel volumétrico, embora sem atingir superioridade estatística. O problema é que o método do anel, devido a sua maior facilidade, é o que melhor se adapta a experimentos que requeiram elevado número de repetições.

Tabela 30. Média, desvio padrão, variância e coeficiente de variação (CV) da massa seca radicular de *Brachiaria humidicola*, determinados com diferentes números de repetições coletadas com anel volumétrico, em duas profundidades do solo.

	Número de Repetições					
	4	8	16	32	64	128
	0-0,1 m					
Média (g dm ⁻³)	1,61	1,80	2,01	2,04	1,74	1,85
Desvio padrão	0,34	0,79	0,60	0,82	0,65	0,70
Variância	0,15	0,63	0,38	0,70	0,43	0,50
CV (%)	21,12	43,89	29,85	40,20	37,36	38,15
	0,1-0,2 m					
Média (g dm ⁻³)	1,32	1,31	1,01	1,08	1,01	1,05
Desvio padrão	0,31	0,39	0,36	0,47	0,42	0,43
Variância	0,13	0,18	0,13	0,23	0,18	0,19
CV (%)	27,63	32,09	36,39	44,24	42,52	41,25

Embora estes resultados demonstrem que não houve diferenças estatísticas entre as médias, e que não há uma diminuição dos CV% em função do aumento do número de amostras, não é possível afirmar, apenas por estes resultados, que a utilização de um número reduzido de repetições em um experimento sob a influência de diferentes tratamentos, refletirá de forma significativa as alterações provocadas pelas diferentes fontes de variação.

Em um trabalho com pastagem de *Brachiaria humidicola* em solos de tabuleiro da Bahia, Rodrigues & Cadima-Zevallos (1991) utilizando 10 repetições, não encontraram diferenças significativas entre duas diferentes pressões de pastejo, embora todos os tratamentos tenham demonstrado diferenças no enraizamento e no comprimento total do sistema radicular, tendo sido observadas diferenças de aproximadamente 20% entre as médias da massa seca radicular nos dois tratamentos estudados. Estes autores sugerem que esta falta de significância da análise estatística pode estar associada à alta variabilidade dos valores obtidos (os valores de CV% não foram apresentados pelos autores).

Em vista dos resultados mencionados (Tabela 30; Rodrigues & Cadima-Zevallos, 1991), foi realizado um estudo mais específico, apoiado no fundamento paramétrico, tal como apresentado por Bengough et al. (2000). Para tal foi considerado o modelo apresentado no material e métodos com o CV% relativo a 128 repetições.

Na Figura 12, são apresentados os resultados da variação da diferença percentual entre médias, em função do número de repetições para um valor de CV = 38% para a profundidade 0-0,1m (Tabela 30).

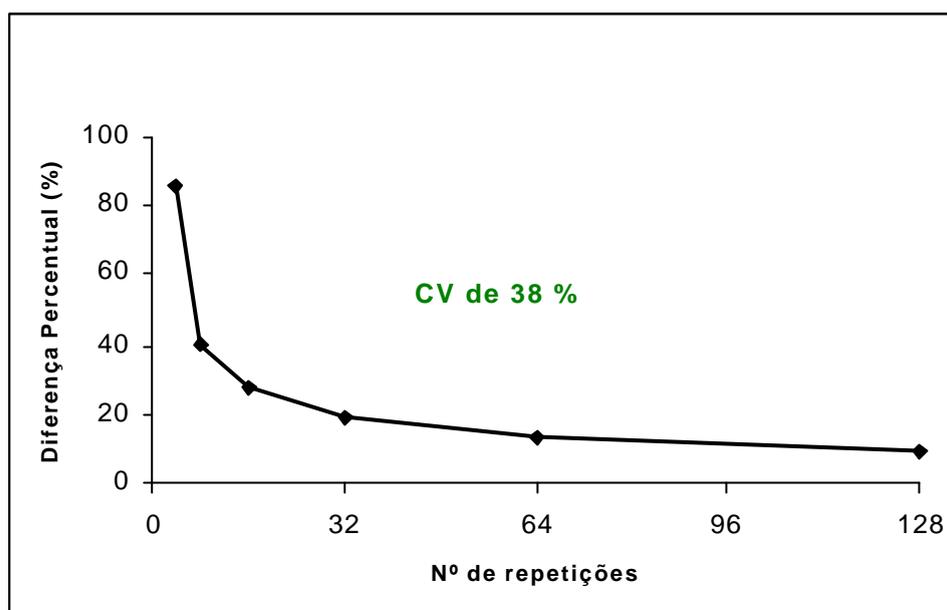


Figura 12. Diferença percentual entre médias da massa seca radicular de *Brachiaria humidicola* na profundidade 0-0,1 m, em função do número de repetições a um dado coeficiente de variação (38,15 %, obtido com 128 repetições).

Pode-se constatar que a partir de 32 amostras coletadas, seria possível detectar aproximadamente 20% de diferenças entre médias, em um modelo teórico entre 2 tratamentos. Este resultado é bastante similar ao apresentado por Van Noordwijk et al. (1985), que determinou em um experimento com coeficiente de variação de 40%, que foram necessárias 25 repetições em cada tratamento para determinar diferenças entre médias de 22%, e de 120 repetições para diferenças de 10%. No entanto, o modelo ajustado por estes autores sugere a utilização de um valor médio prévio de CV para determinar o número de repetições, o que não parece ser o mais adequado, em função do resultado obtido anteriormente. Uma vez que, no presente caso, não houve um nexo claro entre o aumento do número de repetições e decréscimo dos valores de CV (Tabela 30). Neste caso, parece ser primordial para o planejamento da amostragem, a determinação do CV experimental em estudos prévios na pastagem, de forma a estimar o grau de variabilidade espacial do sistema radicular, para a partir deste, conhecer a diferença entre médias possível de ser detectada para um dado número de repetições.

Na Figura 13, são apresentados os resultados da variação da diferença percentual entre médias, em função do número de repetições e do CV referente às 128 repetições para a profundidade 0,1-0,2 m, onde o comportamento obviamente foi similar ao anterior, em função da utilização do mesmo modelo para a estimativa do número de repetições.

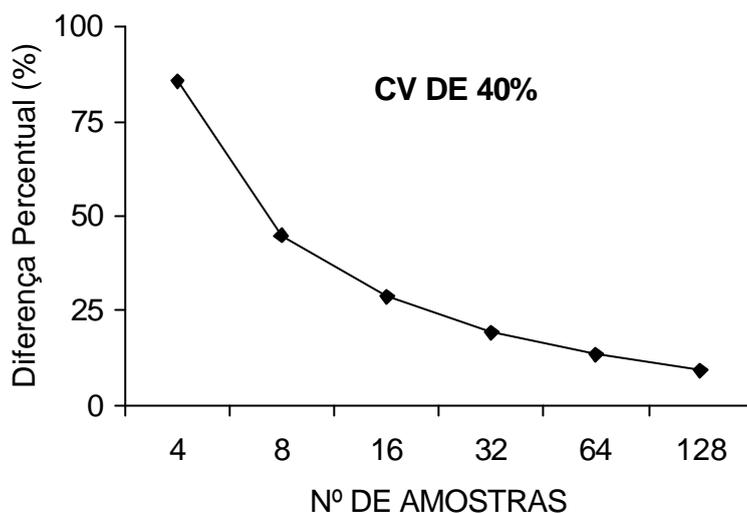


Figura 13. Diferença percentual entre médias da massa seca radicular de *Brachiaria humidicola* na profundidade 0,1-0,2 m, em função do número de repetições a um dado coeficiente de variação (40 %, obtido com 128 repetições).

Para uma mesma diferença percentual de 20% entre duas médias, nesta profundidade seria preciso obter um maior número de repetições, o que poderia se tornar inviável experimentalmente, pois em geral as amostragens são efetuadas simultaneamente nas duas profundidades.

Como o aumento no número de repetições não contribuiu para a redução do CV experimental neste estudo (Tabela 30), e as causas para esta alta variação entre as repetições não estão bem claras, outras formas de avaliação devem ser utilizadas em substituição a utilização da relação “CV% versus número de repetições”. Em experimentos de campo, onde o método de amostragem necessite utilizar 32 amostras por tratamento, se considerarmos 3 tratamentos e 2 profundidades, seriam necessárias 192 amostras por época nestas condições de solo e para esta pastagem, o que poderia tornar o experimento inviável em termos de tempo e de trabalho.

Um aspecto importante que não foi levado em consideração neste método de análise é a variabilidade correlacionada com as coordenadas espaciais (geográficas) de amostragem e as distâncias entre as amostras, que levam em consideração as posições no espaço em que as mesmas foram obtidas. Inicialmente isto não foi levado em conta, já que para estudos do sistema radicular, muitos autores consideram que as raízes da pastagem se distribuem em todas as direções horizontais de forma homogênea, sendo que a densidade radicular varia mais em função da profundidade (distribuição vertical) (Bengough et al., 2000).

Entretanto, não é possível afirmar que estes resultados serão mantidos nesta mesma faixa de variação, se as amostras forem tomadas ao acaso em outros pontos de amostragem da pastagem, já que a distribuição espacial depende da interação individual das plantas e de suas vizinhas com as condições edáficas locais. Desta forma, apenas conhecer o grau de variação em função do número de repetições pode ser um artifício de baixa precisão e de caráter apenas pontual, para a viabilização de protocolos de amostragem e delineamentos experimentais, que contribuam para uma melhor representação dos fenômenos da variabilidade espacial do sistema radicular.

De toda forma, Bengough et al. (2000) relataram que poucos são os estudos que tem sido realizados com o objetivo de determinar quais os esquemas e métodos de amostragem de raízes mais adequados e apropriados às diferentes situações estudadas e culturas de interesse econômico.

Como o modelo adotado neste trabalho está baseado na estatística tradicional, assumimos que os dados desta população de raízes obedecem a uma mesma distribuição, e que cada dado é independente do restante da população seguindo um padrão de distribuição aleatória. O que ocorre é que podemos estar ignorando a complexidade de variação do sistema radicular desta pastagem, já que este sistema se apresenta interconectado e sobre um padrão variável de distribuição tanto horizontal como vertical, pelas variações nas condições edáficas nesta escala de amostragem (1 ha).

A geoestatística apresenta-se como a mais nova ferramenta para estudos de variabilidade espacial de raízes no campo. A partir dos resultados obtidos pela geoestatística, podemos obter informações sobre o fenômeno de dependência espacial da variabilidade entre as amostras, que já tem sido verificada para outras características do sistema solo-planta-atmosfera (Vieira, 2000). Embora já apontada como alternativa para a análise do sistema radicular em substituição às ferramentas da estatística clássica, a geoestatística de raízes ainda encontra-se numa fase muito incipiente.

4.3.2 Distribuição por classes de diâmetro

Foi observado, que à medida que diminuiu o diâmetro das raízes, aumentou a contribuição percentual da classe respectiva na massa seca total radicular da pastagem (Tabela 31). A contribuição, em percentagem, das raízes finas (< 0,8 mm de diâmetro) à massa seca total, representada pelas classes de diâmetro 4 e 5, foi elevada, variando entre 60-65 % para as duas profundidades. Foi observada uma contribuição superior em 10% da classe 5 para a profundidade 0,1-0,2 m quando comparada com a profundidade superior, demonstrando um maior investimento nesta fração em profundidade.

As frações radiculares mais grossas (> 0,8 mm), em conjunto, somaram 28 e 25 % da massa total, nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m, respectivamente (Tabela 31). Os valores desta contribuição são ligeiramente superiores aos encontrados por Brasil et al. (2002), que utilizando um monolito metálico com 1 dm³ de volume, obtiveram uma contribuição das frações média e grossa de 21 % do total da massa seca radicular. Já Oliveira (2000) encontrou resultados diferentes em pastagem de *Brachiaria brizantha* em Latossolo, observando predomínio da biomassa de raízes grossas e médias sobre as raízes finas, independentemente da idade da pastagem e da profundidade de amostragem.

A alocação preferencial de massa seca nas frações mais finas do sistema radicular pode evidenciar uma estratégia adaptativa à baixa fertilidade do solo local (Tabela 1), uma vez que o aumento da superfície específica das raízes pode incrementar a capacidade dos vegetais em explorar um maior volume do solo, e conseqüentemente promover uma maior absorção de água e nutrientes (Clarkson, 1985)

Tabela 31. Distribuição percentual da massa seca radicular de *Brachiaria humidicola*, classificada por cinco classes de diâmetro (médias de 128 repetições).

Classe	Diâmetro (mm)	Distribuição de massa radicular (%)	
		Profundidade 0-0,1 m	Profundidade 0,1-0,2 m
1	> 1,6	9,89 d	11,66 cd
2	1,6 - 1,0	18,74 c	13,75 c
3	1,0 - 0,8	11,85 d	10,13 d
4	0,8 - 0,5	27,08 b	22,19 b
5	< 0,5	32,44 a	42,60 a

Valores seguidos de letras iguais não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$)

Marschner (1985) relatou que o crescimento e a morfologia das raízes podem ser fortemente alterados pelo suprimento de nutrientes. Na pastagem em estudo, instalada em um solo de baixa fertilidade natural e pobre em C orgânico, na ausência de adubação e pastejo sistemático, pode estar sendo estimulada a produção de raízes finas. Este padrão morfológico das raízes desta pastagem pode estar relacionado à própria característica adaptativa da espécie a solos ácidos e de baixa fertilidade, e a tolerância à seca (Rodrigues & Cadima-Zevallos, 1991; Rao et al., 1996; Guenni et al., 2002), levando em consideração o solo em estudo (Tabela 1).

4.4 CONCLUSÕES

A variabilidade dos valores da massa seca radicular da *Brachiaria humidicola* apresentou um padrão que não variou em função do número de repetições.

Os estudos de variabilidade das características radiculares devem respeitar um protocolo que leve em consideração o coeficiente de variação (CV %) inerente ao arranjo espacial das raízes em função de sua interação com o ambiente edáfico.

Há uma alocação preferencial de massa radicular nas frações de raízes finas (diâmetro inferior a 0,8 mm) da *Brachiaria humidicola*, que contribuíram com mais de 60% da massa radicular total na camada de 0-0,2 m de profundidade do solo.

5. CAPÍTULO III

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE GEOESTATÍSTICA NO ESTUDO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DE CARACTERÍSTICAS RADICULARES DE *BRACHIARIA HUMIDICOLA*.

RESUMO

Foi realizado um estudo no Instituto de Zootecnia da UFRRJ com o objetivo de estudar a variabilidade espacial da densidade da massa seca radicular (DMR) de uma pastagem de *Brachiaria humidicola* cultivada em um Planossolo Háptico, através das ferramentas da geoestatística. Uma área desta pastagem foi selecionada para a marcação de um gride de amostragem de 0,5 ha. Para a amostragem foram subdivididas 10 linhas de referência de 50 m de largura, e espaçadas 10 m entre si acompanhando a declividade local. Foram realizadas três coletas com intervalos de dois meses cada uma, nos meses de setembro e novembro de 2001 e janeiro de 2002. Os pontos de amostragem foram estabelecidos em função destas linhas de referências, sendo tomadas dez amostras, espaçadas a 5,0 m dentro de cada linha, em duas profundidades 0,1 e 0,2 m, somando um total de 100 amostras para cada profundidade. Em cada coleta subsequente, os pontos de amostragem foram deslocados na linha, em 1,0 m em relação ao ponto anterior. O método de amostragem consistiu na obtenção de um volume fixo de solo, extraído com auxílio de um anel volumétrico de 0,385 dm³, e os dados de densidade da massa radicular foram calculados para 1 dm³. Os resultados da massa seca foram analisados para testar a hipótese de distribuição normal dos dados. Também foram calculados diferentes parâmetros pela estatística paramétrica. Em seguida, estes dados foram analisados através da geoestatística pelo estudo da variografia, considerando a área de 0,5 ha. Foram calculados os principais parâmetros numéricos para a construção dos semivariogramas, entre épocas e profundidades. Também foram estudados os semivariogramas direcionais e escalonados dos resultados. Em seguida foi realizado um estudo para verificar a variabilidade dos dados em função do gradiente de relevo. Os valores médios da DMR sofreram uma variação temporal, com balanço positivo da massa radicular de 0,663 e 0,278 g dm⁻³ respectivamente para as profundidades 0-0,1 e 0,1-0,2 m. Os maiores valores de CV% sempre foram encontrados na maior profundidade, seguindo uma relação inversa à densidade radicular. O teste de Normalidade demonstrou que a hipótese de distribuição normal dos dados foi rejeitada em todas as profundidades e épocas de amostragem. Foi identificada dependência espacial de fraca a moderada, para a massa de raízes, rejeitando-se a hipótese de distribuição aleatória do sistema radicular sugerida pela estatística paramétrica. O modelo esférico apresentou o melhor ajuste aos semivariogramas experimentais, porém, os valores do efeito pepita foram altos em todas as épocas e profundidades amostradas. O modelo detectou um valor de alcance médio de 27,98 ± 3,46 metros para o gride estudado, demonstrando haver manchas de massa seca de raízes maiores e menores em pontos distintos do terreno. Os semivariogramas direcionais revelaram um comportamento anisotrópico na distribuição do sistema radicular em função das diferentes coordenadas estudadas. Porém, a análise realizada pelos estudos do gradiente de relevo revelou, haver uma interferência do relevo na densidade radicular de *Brachiaria humidicola*, onde os maiores valores da DMR foram encontrados na parte mais baixa do terreno.

Palavras chave: *Brachiaria humidicola*, anisotropia, semivariograma, densidade de raízes.

ABSTRACT

A experiment was installed at the Animal Science Institute of UFRRJ with the objective to study spatial variability of the root dry mass density (DMR) of a pasture of *Brachiaria humidicola*, cultivated in a Planossolo Háplico (Fragiudult), using geostatistic tools. A section of the pasture was selected to establish a sampling grid of 0.5ha. For sampling procedure, 10 rows of 50 m length were marked, spaced 10m among then, following the declivity. Three samples were performed, with intervals of two months between each one, in September and November 2001 and January 2002. Sampling points were established in these rows, and ten samples were taken, 5.0 m spaced within each row, at two soil depths of 0.1 and 0.2 m, totaling 100 samples for each depth. For each subsequent sample, the sampling points were dislocated within each row, by 1.0 m as related to the previous point. A fixed soil volume was sampled with a volumetric cylinder of 0.385 dm³, and data of root mass density were converted to 1,0 dm³. Data of root mass were analyzed to test the hypothesis of normality of data. Different parameters of parametric statistic were calculated. These data were analyzed by the geostatistic by the study of variography, considering the area of 0.5 ha. The main numeric parameters for semivariograms were calculated, between sampling times and depths. The directional and scaled semivariograms were also studied. The variability of data as a function of relief gradient was also studied. Mean values of DMR presented a time variation, with a positive balance of root mass of 0.663 and 0.278 g dm⁻³ for the depths of 0-0.1 and 0.1-0.2 m, respectively. The higher values of CV% were always found in the deeper layer, following an inverse relation of root density. The hypothesis of normal distribution was rejected in every depth and time of sampling. A spatial dependence from low to moderate was identified for root mass, and the hypothesis of random distribution of the root system, suggested by the parametric statistic, was rejected. The spherical model presented the best adjustment to the experimental semivariograms, but the values of the nugget effect were high in every time and depth. The model detected an average range value of 27.98 ± 3.46 m to the studied grid, demonstrating spots of low and high root mass in distinct points. The directional semivariograms revealed an anisotropy pattern of root system distribution as a function of the coordinates. However, the analysis of the relief gradient revealed an interference of the relief in the root density of *Brachiaria humidicola*, where the highest values of DMR were found in the lowest parts of the land.

Keywords: *Brachiaria humidicola*, anisotropy, semivariogram, root density.

5.1 INTRODUÇÃO

Tradicionalmente os experimentos agrícolas utilizam a estatística clássica para avaliação dos resultados, baseando-se em técnicas como a casualização e repetição. A análise dos dados é feita sob a hipótese de independência estatística ou distribuição espacial aleatória, assumindo que cada dado é independente do restante da população (Bengough et al., 2000). Esta hipótese permite o uso de métodos estatísticos como a análise de variância e de parâmetros como o coeficiente de variação (Capítulo II).

No entanto, são comuns situações de estudo em que a análise de variância não tem sentido se não considerar a distância entre as amostras (Vieira, 2000). Este parece ser o caso dos estudos de variação do sistema radicular, onde o sistema se apresenta interconectado ao longo do perfil de enraizamento, e sobre um padrão variável de distribuição espacial e temporal, por força da sua fenologia e pelas variações nas condições edáficas (Jackson & Caldwell, 1993; Bengough et al., 2000; Plant, 2001). Nestes casos é necessário admitir a presença de dependência espacial entre as amostras e se utilizar a técnica de avaliação dos dados através da geoestatística.

A geoestatística objetiva o estudo dos fenômenos que flutuam no tempo e/ou no espaço, oferecendo uma relação de ferramentas determinísticas e estatísticas que possibilitam entender e modelar a variabilidade espacial (Vieira, 2000). Esta ferramenta tem sido apresentada como uma nova alternativa para estudos de variabilidade espacial de raízes no campo (Bengough et al., 2000). Entretanto, estes trabalhos são muito raros na literatura mundial, e sobretudo nenhum trabalho foi encontrado até o momento utilizando esta técnica em estudos de variabilidade do sistema radicular de gramíneas forrageiras. Todos os conceitos de geoestatística têm suas bases teóricas em funções e variáveis aleatórias. Uma função aleatória, pelo fato de ser contínua, pode ser submetida a uma grande gama de hipóteses, sem as quais a dedução de equações é impossível.

Segundo Vieira (2000), uma variável regionalizada é estacionária se os momentos estatísticos da variável aleatória $Z(x_i+h)$ forem os mesmos para qualquer vetor h . A existência de estacionariedade dá a oportunidade de repetir um experimento mesmo que as amostras devam ser coletadas em pontos diferentes, porque todas são consideradas pertencentes a populações com os mesmos momentos estatísticos (Vieira, 2000).

Segundo Deutch & Journel. (1998), a estacionariedade é uma propriedade do modelo e assim torna-se mais uma decisão do que uma hipótese de trabalho. A decisão de estacionariedade pode mudar com a escala do trabalho e com a disponibilidade dos dados. Para a geoestatística o variograma tem papel crucial, pois ele é a chave para descrever e entender a variabilidade espacial de forma quantitativa, bem como para fazer previsões a respeito do fenômeno estudado (McBratney & Webster, 1986).

O variograma é uma função matemática (eq-1) definida para representar o nível de dependência espacial entre duas variáveis aleatórias locais (Vieira, 2000).

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

$2\gamma(h)$ – é a variância em função do vetor h ;

E – valor esperado;

$Z(x_i)$ – valor da variável na posição x_i ;

$Z(x_i+h)$ - valor da variável na posição x_i+h .

O semivariograma (eq-2) é a mesma função anterior acrescida do fator de divisão 2, função $\gamma(h)$. O fator 2 é utilizado com a finalidade de cancelamento e simplificação da equação e porque a quantidade mais freqüentemente utilizada é $\gamma(h)$ e não $2\gamma(h)$.

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

O semivariograma também pode ser representado como um gráfico da função de dependência espacial em relação à distância (Figura 14).

Ao semivariograma experimental, calculado a partir das observações, associam-se modelos teóricos de semivariogramas, definidos pelo tipo de modelo (linear, esférico, gaussiano, exponencial, potencial) e pelos parâmetros numéricos efeito pepita, patamar e alcance. No exemplo da figura 14, o semivariograma experimental está plotado em círculos cheio, enquanto que o modelo teórico (esférico) é a linha pontilhada em preto.

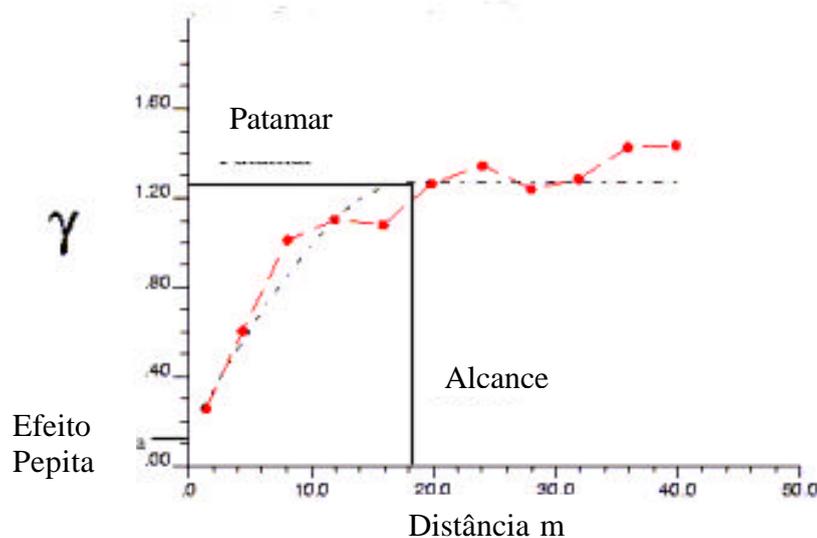


Figura 14. Representação gráfica do semivariograma.

O *efeito pepita* (a) revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. O efeito pepita é causado por variabilidade em pequena escala, por erro de amostragem, de determinação ou do limite do equipamento. À medida que h aumenta, $\gamma(h)$ também aumenta até um valor máximo no qual se estabiliza, denominado *patamar*. O patamar é aproximadamente igual à variância dos dados, $\text{Var}(z)$. Através do patamar pode-se medir a variabilidade do fenômeno (Vieira, 2000). O alcance refere-se à distância no qual $\gamma(h)$ atinge o patamar e representa a distância limite de dependência espacial. Dentro dos limites do alcance, as medições são correlacionadas umas às outras, o que permite que se façam interpolações para espaçamentos menores do que os amostrados. Devido a isto o alcance é utilizado para avaliar o grau de continuidade espacial dos dados. Além do alcance, as medições apresentam distribuição espacial aleatória e podem ser consideradas independentes entre si e a estatística clássica pode ser aplicada sem restrições (Vieira, 2000).

O objetivo deste trabalho foi estudar a variabilidade espacial da densidade da massa seca radicular de uma pastagem de *Brachiaria humidicola* cultivada em um planossolo háplico, através das ferramentas da geoestatística. Espera-se também com este trabalho contribuir com informações para futuros protocolos de amostragem do sistema radicular de gramíneas forrageiras.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Localização do estudo

O experimento foi instalado no Setor de Caprinocultura da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), na área de pastagem de *Brachiaria humidicola* descrita anteriormente (Capítulos I e II) e realizado durante o período de setembro de 2001 a janeiro de 2002.

Uma área da pastagem foi selecionada para a marcação de um gride de amostragem. Foram demarcadas dez linhas de referências com 50 m de largura, com um espaçamento de 10 m entre elas, perfazendo 100 m de comprimento, a partir de uma linha de referência inicial tomada na parte mais alta do terreno. O eixo X foi referente à largura de 50 m e o eixo Y o comprimento de 100 m com a declividade do terreno.

Cada linha de referência foi então subdividida em 10 pontos distantes 5,0 m entre si, acompanhando a declividade local, totalizando 50 m de largura. A área total amostrada correspondeu, portanto, a 5000 m² (100 x 50 m = 0,5ha).

5.2.2 Critérios de amostragem

Foram realizadas três coletas com intervalos de dois meses cada uma, nos meses de setembro e novembro de 2001 e janeiro de 2002. Os pontos amostrais foram estabelecidos em função das linhas de referências, sendo tomadas dez amostras, espaçadas a 5,0 m dentro de cada linha, em duas profundidades 0,1 e 0,2 m, somando um total de 100 amostras para cada profundidade (Bengough et al., 2000). Em cada coleta subsequente, os pontos de amostragem foram deslocados na linha, em 1,0 m em relação ao ponto da amostragem anterior.

O método de amostragem consistiu na obtenção de um volume fixo de solo, extraído com auxílio de um anel volumétrico com 0,385 dm³ (h = 0,1m; Ø = 0,07 m) (Oliveira et al., 2000). Os dados de densidade radicular foram calculados para 1 dm³, com o objetivo de padronizar os resultados do trabalho.

As amostras extraídas foram condicionadas em sacos plásticos numerados e conservadas à sombra até o momento de seu processamento. As raízes foram recuperadas seguindo os mesmos procedimentos descritos no item 3.2.6.

5.2.3 Estatística descritiva dos dados

Para uma avaliação do comportamento global dos dados, foi realizado um estudo estatístico para testar a hipótese de distribuição normal dos valores de densidade da massa seca radicular (DMR) no gride de 0,5 ha da pastagem. Foi utilizado o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov (Liliefors), em todas as três épocas de amostragem e nas profundidades 0-0,1 m e 0,1-0,2 m. Também foram calculados os valores Mínimo, Máximo, Mediana, Assimetria, Curtose, Desvio Padrão, Variância e Coeficiente de Variação (Tabela 32).

5.2.4 Geoestatística

O estudo de variabilidade através da geoestatística compreendeu as fases de análise exploratória dos dados e a variografia, seguindo as informações descritas por Vieira (2000) e Vieira et al. (2002). Para estas análises utilizou-se o software GEOSTAT (Vieira et al., 1983).

O estabelecimento da área de amostragem considerou um retângulo na pastagem de área S = 0,5 ha, para o qual foi medido um conjunto de valores {z(xi), i=1, n}, onde

xi identifica a densidade da massa seca radicular em uma posição no espaço representada pelos pares de coordenadas (xi, yi).

Foram calculados os parâmetros numéricos: efeito pepita (C_0), componente estrutural (C_1), alcance (a), coeficiente de determinação (R^2), soma do quadrado dos desvios (SQDP) e contribuição percentual de C_0 ($C_0 \cdot 100 / (C_0 + C_1)$) para a construção dos semivariogramas, entre épocas e profundidades.

Para o ajuste dos semivariogramas experimentais o modelo utilizado foi o modelo com patamar do tipo esférico, segundo a fórmula abaixo:

$$g(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad 0 < h < a$$

O modelo esférico é

$$g(h) = C_0 + C_1 \quad h > a$$

obtido selecionando-se os valores do efeito pepita, C_0 , e do patamar, $C_0 + C_1$, depois passando-se uma reta que intercepte o eixo y em C_0 e seja tangente aos primeiros pontos próximos de $h=0$. Essa reta cruza o patamar à distância, $a'=2/3 a$. Assim, o alcance, **a**, será $a=3a'/2$. O modelo esférico é linear até aproximadamente $1/3 a$ (Vieira, 2000). Este modelo foi escolhido dentre outros testados, por ter apresentado melhores valores de R^2 e de SQDP.

Foram analisados os semivariogramas direcionais para as principais direções de análise da vizinhança dos dados, sendo estas: 0° - na direção do eixo X, 90° - na direção do eixo Y, 45° e -45° - nas duas diagonais, segundo descrito por Vieira (2000), com o objetivo de caracterizar se houve um efeito da coordenada na variabilidade dos dados de massa seca radicular.

Foram calculados os semivariogramas escalonados segundo o método do escalonamento dos semivariogramas descrito por Vieira et al. (1991). Sendo este escalonamento feito a partir do quociente obtido pela medida do semivariograma e a variância total dos dados, de forma que todos os valores de semivariância fiquem em uma mesma escala.

5.2.5 Análise dos dados com referência à posição no relevo

Para esta análise, as séries numéricas correspondentes às dez repetições por linha foram analisadas isoladamente de forma a caracterizar os diferentes parâmetros de dispersão convencionais (média, desvio padrão e coeficiente de variação), para cada nível de referência do relevo.

Em seguida, as médias das amostras foram dispostas num plano x-y, onde $x=d$ (m), distância da linha de referência (a partir da primeira linha, considerando $d=0$), e y = densidade da massa seca de raízes (DMR, $g\text{ anel}^{-1}$), e sua relação empírica investigada a partir de vários modelos de regressão. O melhor ajuste encontrado a todos os grupos de dados avaliados, tanto por época de amostragem como por profundidade foi o de uma polinomial cúbica da forma: $DR = A + B \cdot d + C \cdot d^2 + D \cdot d^3$, onde A, B, C e D são os coeficientes de regressão.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1 Estatística descritiva dos dados

Os resultados apresentados na Tabela 32, referentes ao intervalo de setembro de 2001 a janeiro de 2002 (época das águas), demonstram que os valores médios da DMR sofreram uma variação temporal, com balanço positivo da massa radicular de 0,255 e 0,107 g anel¹ respectivamente para as profundidades 0-0,1 e 0,1-0,2 m. Embora de baixa magnitude, este resultado demonstra que a taxa de crescimento das raízes foi superior à taxa de mortalidade, como resposta de recuperação do sistema radicular pela disponibilidade de água, aos efeitos da sazonalidade de produção que ocorre no período seco.

Os valores do coeficiente de variação experimental oscilaram de 46 a 69 % para ambas as profundidades, sendo confirmada a maior variabilidade na profundidade 0,1-0,2 m, na segunda e terceira época de amostragem.

Esta variabilidade foi superior a encontrada na sub-parcela vizinha desta mesma pastagem, apresentada no capítulo II, onde o CV% para a profundidade 0,2 m com 128 repetições foi de 40%, portanto inferior ao menor CV% encontrado neste trabalho. Isto significa que considerando o modelo adotado anteriormente, nesta mesma pastagem, seria necessário gerar dois protocolos de amostragem baseados no número de repetições, para detectar as mesmas diferenças entre médias entre dois tratamentos em uma área de aproximadamente 1,5 ha, o que na prática não teria sentido. Esta diferença de variação, deve estar representando uma maior variabilidade dos dados do sistema radicular inerente a esta subparcela de 0,5 ha, e/ou de forma complementar, estes valores podem estar associados à variabilidade do arranjo espacial do gride de amostragem.

Os maiores valores de CV% sempre foram encontrados na maior profundidade, seguindo uma relação inversa à densidade radicular, conforme já discutido anteriormente. Porém deve-se ressaltar, que os valores da variância sempre acompanharam a mesma tendência de aumento ou redução dos valores do coeficiente de variação, o que nem sempre vem sendo observado.

Os valores de CV% também demonstraram haver uma tendência ao aumento deste coeficiente em função da época nas duas profundidades, sendo observados os maiores valores de CV% na 2^a e 3^a época de amostragem.

Os valores médios da densidade da massa seca radicular foram sempre superiores à Mediana, sendo apenas observado um valor muito próximo na primeira época para a profundidade 0,1-0,2 m, o que correspondeu também aos menores valores de Assimetria e Curtose com valores de 0,519 e 0,166 respectivamente. Webster (2001) considera que valores = 0,5 de assimetria corresponderia a distribuição normal dos dados. Todos os demais resultados apresentaram valores de média significativamente maiores que a Mediana, refletindo também em valores elevados de Assimetria e Curtose.

Tabela 32. Estatística descritiva dos dados de densidade da massa seca radicular (DMSR) (g anel¹) de uma pastagem de *Brachiaria humidicola* em três épocas e duas profundidades de amostragem (valores médios de 100 repetições).

Parâmetros Estatísticos	Épocas de Amostragem					
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	1 ^a	2 ^a	3 ^a
	(Set 01)	(Nov 01)	(Jan 02)	(Set 01)	(Nov 01)	(Jan 02)
	Profundidade 0-0,1 m			Profundidade 0,1-0,2 m		
Média	1,134	1,236	1,389	0,483	0,548	0,590
Mediana	1,06	1,1	1,2	0,48	0,455	0,525
Desvio Padrão	0,5261	0,6547	0,7492	0,2311	0,3755	0,3622
CV (%)	46,40	52,98	53,96	47,81	68,56	61,37
Mínimo	0,25	0,23	0,30	0,05	0,04	0,09
Máximo	2,69	3,47	4,48	1,14	2,23	2,22
Assimetria	0,790	1,057	1,666	0,519	1,893	1,306
Curtose	0,317	0,916	3,979	0,166	5,005	3,163
Teste de Normalidade Kolmogorov-Smirnov (liliefors)						
Desvio Máximo	0,1133**	0,1418**	0,1364**	0,0902*	0,1368**	0,0909*

*e ** significativo aos níveis de 0,05 e 0,01 respectivamente.

O teste de Normalidade, demonstrou que a hipótese de distribuição normal dos dados foi rejeitada em todas as profundidades e épocas de amostragem. Foi observada uma ligeira tendência para os dados da profundidade 0,1-0,2m aproximarem da distribuição normal nas épocas 1 e 3 de amostragem, com os valores de desvio máximo dos dados muito próximos ao valor crítico a 5% de probabilidade, demonstrando um maior grau de variação de frequências de classes de massa seca para a profundidade 0,1 m.

A distribuição da frequência relativa dos dados de DMR pode ser visualizada nas Figuras 15 e 16. Optou-se por apresentar os resultados com o melhor contraste, ou seja, a distribuição que mais se aproxima da normalidade (Figura 15), e a que obteve o maior índice de rejeição desta hipótese representada pela Figura 16, os demais resultados que representam as distribuições relativas referentes às demais épocas e profundidades, estão no anexo deste capítulo.

Os resultados da Figura 15 que demonstram estar mais próximos da distribuição normal, apresentam 96% dos valores da DMR contidos entre 0,1 e 1,1 g de massa seca de raízes, com apenas 4 destes valores fora desta faixa.

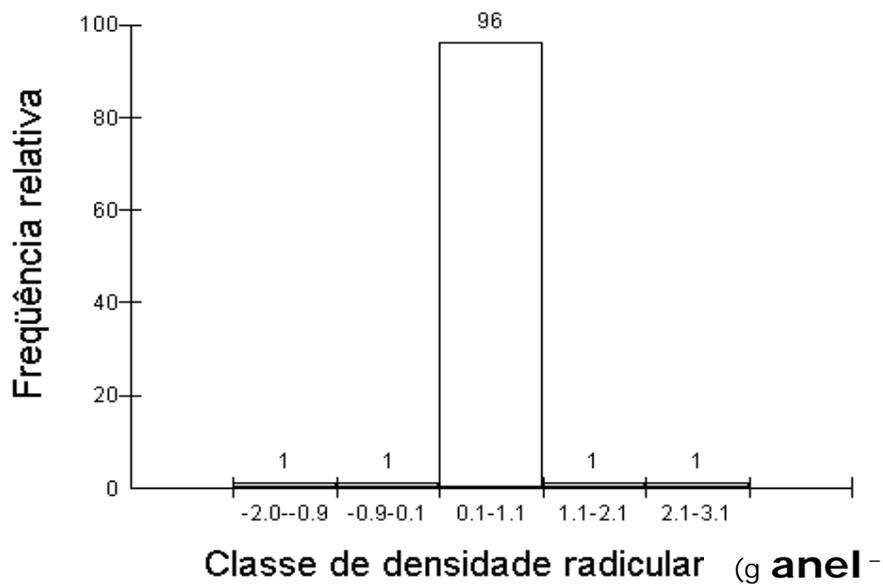


Figura 15. Frequência relativa dos valores da densidade de massa seca radicular da profundidade 0,1-0,2 m na 1ª época de amostragem.

A Figura 16 demonstra um padrão completamente diferente de distribuição de classes de DMR. Esta distribuição é bastante similar ao padrão Log Normal, com assimetria positiva, onde apenas 66% das amostras se encontram entre 0,2-1,3 g de raízes, sendo em seguida observada uma concentração de 25% dos valores na faixa 1,3-2,4 g de raízes por anel.

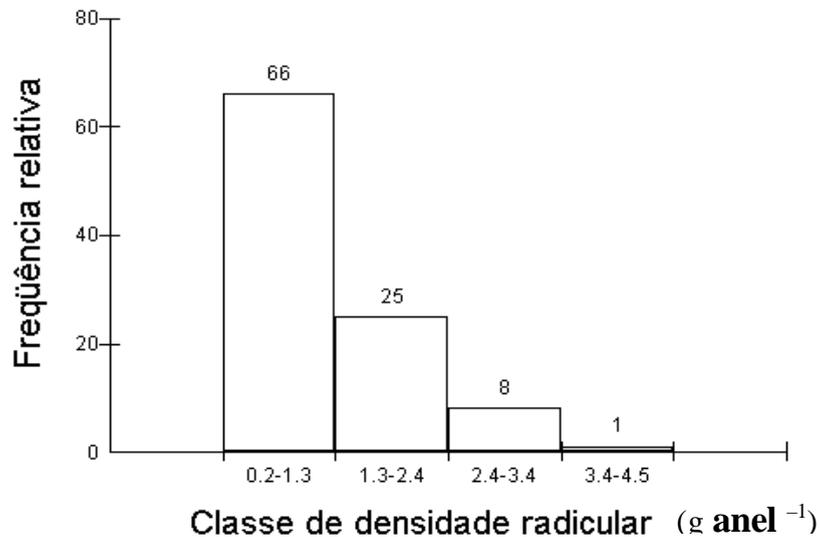


Figura 16. Frequência relativa dos valores da densidade da massa seca radicular da profundidade 0-0,1 m na 2ª época de amostragem.

5.3.2 Análise do semivariograma experimental

Os resultados referentes ao modelo teórico e aos parâmetros numéricos associados aos semivariogramas experimentais utilizados para estimar a dependência espacial do sistema radicular da pastagem estudada são apresentados na Tabela 33.

Os valores de R^2 de ajuste do modelo foram relativamente baixos (R^2 variando de 0,07 a 0,48), sendo que o número de pares (passo) utilizado na análise do semivariograma, foi a própria distância entre as amostras (5 x 10 m), considerado passo igual a 1. Se no cálculo do semivariograma fosse adotado um valor para o passo maior que 1, utilizando um número maior de pares na estimativa da semivariância dos dados, possivelmente poderia-se obter modelos com R^2 superiores aos encontrados, pois estaríamos reduzindo os desvios em função da distância (h). Entretanto, neste trabalho, o valor de R^2 não é o critério de maior relevância, uma vez que se pretende explicar a dependência espacial das raízes na pastagem estudada a partir das distâncias entre as amostras, e não o melhor ajuste do semivariograma para a interpolação de dados.

Tabela 33. Dados do modelo teórico esférico, efeito pepita (C_0), componente estrutural (C_1), alcance (a), coeficiente de determinação, soma do quadrado dos desvios e contribuição percentual de C_0 para a construção dos semivariogramas da densidade da massa seca radicular de *Brachiaria humidicola*.

Época	C_0	C_1	a	r^2	SQDP	$C_0 * 100 / (C_0 + C_1)$
Profundidade 0-0,1 m						
1 ^a	0,18	0,12	30,0	0,3217	0,0018	59,0
2 ^a	0,36	0,07	21,6	0,0722	0,0019	83,0
3 ^a	0,42	0,17	30,0	0,2616	0,0025	71,4
Profundidade 0,1-0,2m						
1 ^a	0,02	0,03	30,0	0,4782	0,0001	40,0
2 ^a	0,12	0,03	30,0	0,1423	0,0002	81,6
3 ^a	0,11	0,03	26,3	0,0799	0,0004	78,2

Os resultados demonstraram que existe um grau de dependência espacial variando de fraca a moderada (Cambardella et al., 1994), segundo os valores calculados para a relação efeito pepita (C_0) e o componente estrutural (C_1), com valores de patamar bem definido em ambos os casos, entre os valores da densidade radicular da *Brachiaria humidicola* e a distância (m) entre as amostras.

Os valores de patamar foram sempre muito próximos aos valores da variância total dos dados, demonstrando a estacionaridade da distribuição da DMSR desta pastagem (Tabela 34).

Tabela 34. Comparação dos valores de Patamar e variância total dos dados estudados por época e profundidade de amostragem.

Época	Patamar ($C_0 + C_1$)	Variância Total
Profundidade 0-0,1 m		
1	0,30	0,28
2	0,43	0,43
3	0,59	0,56
Profundidade 0,1-0,2 m		
1	0,05	0,05
2	0,15	0,14
3	0,14	0,13

Os valores do alcance (a) desta dependência espacial variaram de 21,6 a 30 m (média de $28 \pm 3,5$), podendo-se verificar uma baixa variação destas distâncias que limitam a dependência espacial, mesmo com as variações temporais promovidas pelos intervalos entre as coletas (Tabela 33). Esta distância média está relacionada, com o tamanho das manchas de maior e de menor valor de densidade radicular no gride de amostragem (0,5 ha). Pode-se atribuir como principais condicionantes para esta configuração da malha de distribuição das raízes, as variações locais do ambiente edáfico, que condicionam o crescimento e o padrão de enraizamento (Planossolo, com horizontes superficiais arenosos), que pode estar sendo também condicionada pela pendente do relevo local ($\pm 7\%$).

Esta correlação espacial dos dados com as distâncias neste estudo torna nula a hipótese de independência estatística da distribuição espacial do sistema radicular desta

pastagem, o que vem confirmar os diferentes padrões de variabilidade situados dentro deste mesmo piquete. Esta informação é inovadora e de caráter original, sendo de suma importância para o estabelecimento de futuras estratégias de amostragem do sistema radicular.

Embora esta dependência espacial já tenha sido sugerida por alguns autores para o sistema radicular (Bengough et al., 2000), nenhum outro estudo de geoestatística de raízes de gramíneas forrageiras, e sobretudo nas condições de clima tropical, foi encontrado em nossa revisão de literatura. A escassez destes estudos é demonstrada principalmente pelos resultados apresentados pela literatura internacional, que justificam o estudo das raízes de gramíneas forrageiras considerando uma dispersão de forma aleatória, onde os parâmetros da estatística convencional como CV% e o aumento do número de repetições são tomados como decisivos para encontrar diferenças estatísticas entre médias de diferentes tratamentos (Kopke, 1981; van Noordwijk et al., 1985; Bengough et al., 2000 e o Capítulo II). Nos estudos que avaliam alterações do sistema radicular de pastagens quase sempre, os autores atribuem a ausência de significância estatística à grande variabilidade encontrada nos dados (Rodrigues & Cadima-Zevallos, 1991) entre tratamentos.

Como o alcance é a linha divisória para aplicação da geoestatística, pode-se assumir que as amostras de densidade radicular medidas nesta pastagem, com distâncias superiores aos valores de alcance estimados, não mais estão correlacionadas, apresentando distribuição espacial aleatória. Segundo Vieira (2000), os dados que se encontram em distâncias entre si superiores ao alcance, poderiam ser tratados por métodos da estatística clássica em sua análise. Por outro lado, amostras separadas por distâncias menores que o alcance, são correlacionadas umas as outras, o que permite que se faça interpolações para espaçamentos menores do que os amostrados.

Faz-se importante discutir, que a sugestão de que um critério de amostragem baseado em distâncias de 30 em 30 m, embora podendo ser analisado pela estatística convencional, pode estar desprezando a variabilidade espacial inerente a este intervalo, o que já estaria embutindo uma nova fonte de erro para o cálculo do CV%. Também, de forma complementar, com a informação do alcance da dependência espacial, poderão ser gerados protocolos de amostragem que melhor representem as variações locais, de forma a melhor caracterizar a variabilidade espacial das características do sistema radicular. Como efeito, pode-se sugerir que se uma nova amostragem fosse efetuada nesta pastagem, e ainda houvesse o objetivo de produzir mapas de distribuição espacial, o espaçamento entre amostras deveria, no mínimo, ser metade dos alcances encontrados.

De forma geral, os semivariogramas apresentaram altos valores de efeito pepita (C_0) nas três datas e duas profundidades de amostragem, caracterizando uma grande variação aleatória da densidade radicular entre os espaçamentos de 5 metros. Estes resultados demonstram uma conformação do semivariograma diferente do que se espera, onde os valores de C_0 tendem a zero quando mais próximas as amostras se encontram das amostras vizinhas. Este padrão é esperado, supondo que medições realizadas com localizações próximas, sejam mais parecidas entre si do que aquelas separadas por grandes distâncias (Burrough, 1993; Vieira, 2000).

Os valores de C_0 quase sempre foram superiores aos valores do componente estrutural (C_1), a não ser na 1ª coleta na profundidade 10-20, onde foi encontrado o melhor ajuste do modelo esférico (R^2 0,48) associado à menor contribuição percentual do efeito pepita na análise do semivariograma (Figura 17)

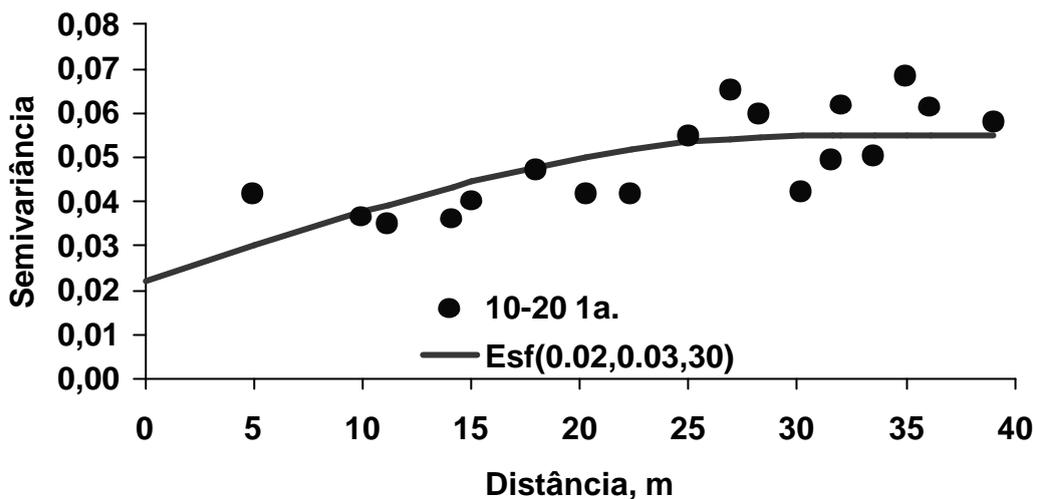


Figura 17. Semivariograma dos valores da densidade da massa seca radicular da profundidade 0,1-0,2 m na 1ª época de amostragem. Este resultado pode ser também analisado de forma complementar através do semivariograma direcional apresentado na Figura 18.

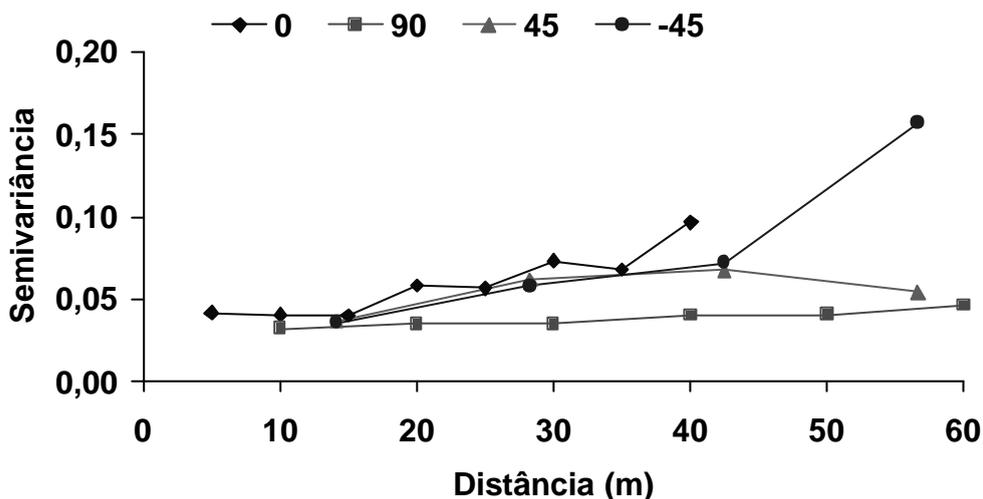


Figura 18. Semivariogramas direcionais referentes à 1ª época de amostragem na profundidade 0,1-0,2m.

As semivariâncias dos valores de DMSR são apresentadas de forma separada em função dos ângulos de análise. Através desta análise pode-se verificar que os valores de semivariância variaram ligeiramente em função dos ângulos analisados. Todavia, estas variações não foram tão acentuadas, havendo uma significativa tendência à manutenção de uma certa homogeneidade da variação em todas as direções. Não foi observada em nenhuma outra época e profundidade amostrada esta mesma tendência, evidenciando um comportamento anisotrópico na distribuição do sistema radicular em função das diferentes coordenadas estudadas pelo semivariograma direcional.

Os semivariogramas direcionais que sempre apresentaram os resultados mais dispersos foram para o ângulo de 90°, que representa a distribuição na direção do eixo Y do gride de amostragem, onde a conformação do semivariograma sempre foi próxima a do Efeito pepita puro, com valores de semivariância constantes para todas as distâncias. Este resultado é de suma importância para o entendimento da variabilidade, já que o eixo 90° representa a distância de 100 metros seguindo a pendente do terreno, revelando

um efeito do relevo para maior contribuição nos valores de variabilidade em pequena escala. Também foi observada uma alta variabilidade para os demais ângulos, quando foram obtidos os piores ajustes do semivariograma experimental. Estes resultados justificaram a análise dos dados que será apresentada a seguir, onde foi realizado um estudo exploratório para verificar de forma comparativa a influência do relevo nos valores médios da DMSR obtidos nas linhas de referência do *gride* experimental.

O semivariograma que apresentou o maior valor de contribuição do efeito pepita C_0 , foi o da 2ª época de amostragem na profundidade 0-0,1m, onde o valor de C_0 contribuiu de forma significativa com 83 % de toda a variação, sendo o efeito da distância (m) bastante reduzido e o modelo esférico ajustado com R^2 de 0,07 (Figura 19).

Estes resultados condizem com os encontrados no estudo de normalidade dos dados, onde os valores de DMSR que se encontraram mais dispersos entre classes foram justamente os referentes a este semivariograma. Como optou-se por sempre utilizar dois exemplos de maior contraste para a discussão deste capítulo, e como os demais semivariogramas mantiveram um comportamento similar a este ultimo apresentado, estes também estão apresentados no anexo deste capítulo.

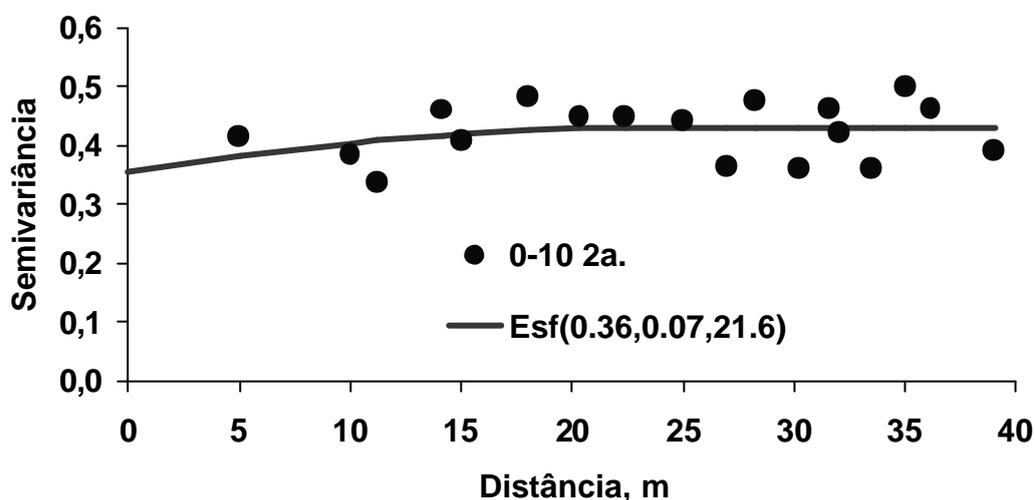


Figura 19. Semivariograma dos valores da densidade da massa seca radicular da profundidade 0-0,1 m na 2ª época de amostragem.

Na figura 20, é apresentado o semivariograma direcional referente a esta época e profundidade de amostragem. Corroborando com o exposto acima, este semivariograma apresentou um maior efeito das coordenadas sobre o padrão de distribuição espacial, sugerindo uma maior grau de anisotropia das raízes.

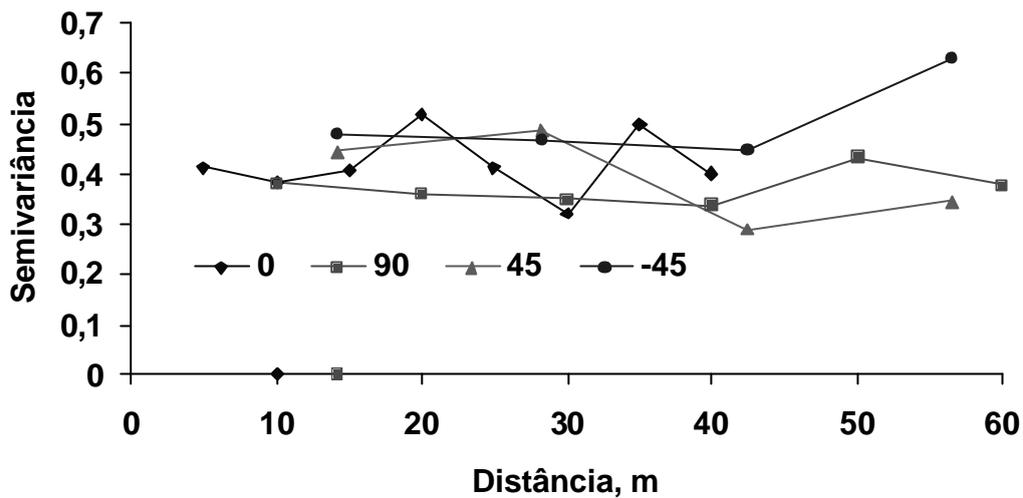


Figura 20. Semivariogramas direcionais referentes a 2ª época de amostragem na profundidade 0-0,1m

Como já foi discutido anteriormente a partir dos resultados obtidos por Stafanato et al. (2002), o tamanho do amostrador associado a perdas na quantificação de raízes finas, pode representar uma fonte de erro, o que poderia estar contribuindo para estas variações em pequena escala. Também se pode sugerir que a densidade de amostras adotada neste gride (100 amostras $0,5 \text{ ha}^{-1}$) pode ter sido insuficiente para representar toda a variabilidade local. Porém é impossível quantificar quais destes fatores contribuem mais, os erros de medição ou a variabilidade em escalas menores do que a escala adotada para efetuar esta amostragem (Vieira, 2000). Como a distância mínima entre amostras no gride selecionado foi de $5\text{m} \times 10\text{m}$ abrangendo uma área de 50 m^2 entre as amostras vizinhas (no gride de $0,5 \text{ ha}$), pode-se sugerir que os experimentos com gramíneas de hábito de crescimento prostrado como no caso da *Brachiária humidicola* e em solos com perfil de enraizamento como o Planossolo, deve-se optar inicialmente por um gride menos espaçado, concentrando mais as amostras. O objetivo disto se deve, a necessidade de detectar se realmente ocorre uma alta variabilidade da distribuição espacial da massa de raízes em escala menor, e até mesmo qual a menor escala de variação desta característica radicular.

Com a finalidade de comparar a variabilidade espacial de cada uma das variáveis, a partir dos resultados de épocas e profundidades de amostragem, foi utilizado o método de escalonamento dos semivariogramas como descrito por Vieira et al. (1991). Este escalonamento é feito a partir do quociente obtido pela medida do semivariograma e a variância total dos dados, de forma que todos os valores de semivariância fiquem em uma mesma escala.

Na figura 21 é apresentado o semivariograma escalonado nas diferentes épocas para a profundidade 0-0,1 m. De modo geral, pode-se observar que a variabilidade espacial entre épocas seguiu uma tendência diferenciada, onde as amostras apresentam valores de semivariância oscilando de forma bastante dispersa, sem destaque para valores sempre maiores ou menores.

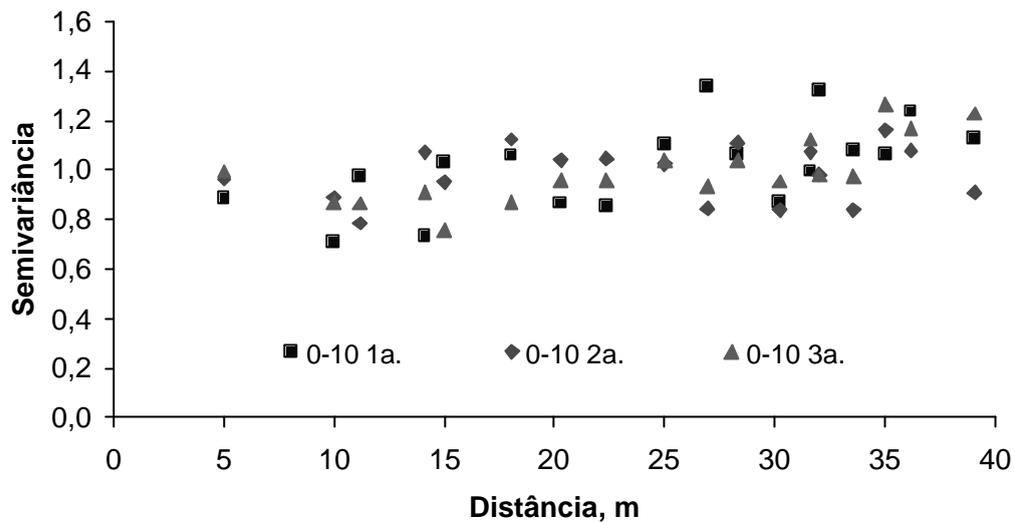


Figura 21. Semivariograma escalonado dos valores da densidade da massa seca radicular na profundidade 0,1m, em todas as épocas de amostragem.

Este mesmo comportamento foi evidenciado para a profundidade 0,1-0,2m conforme mostra a Figura 22, sendo que a terceira época de amostragem apresentou os maiores valores de semivariância.

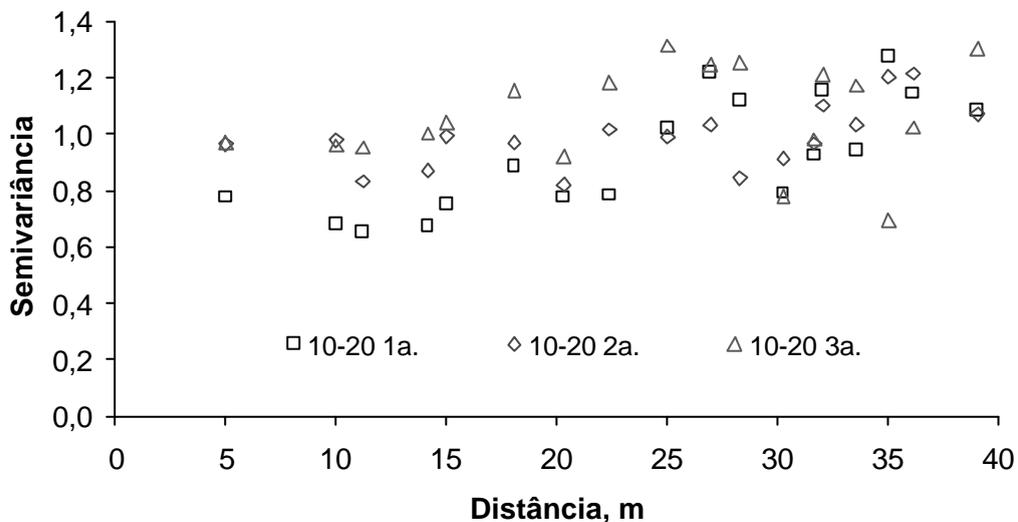


Figura 22. Semivariograma escalonado dos valores da densidade da massa seca radicular na profundidade 0,1-0,2 m, em todas as épocas de amostragem.

Na 1ª época nesta mesma camada, em que se obteve o semivariograma que melhor se ajustou ao modelo proposto deste trabalho, conforme já demonstrado anteriormente, foi onde foram obtidos os menores valores de semivariância na maioria dos resultados.

5.3.3 Variabilidade com Referência ao Gradiente de Relevo

Os valores médios de dez amostras referentes às variações espaciais da massa seca radicular nas três épocas de amostragem para as profundidades 0-0,1 m são apresentados nas Figuras 23, 24 e 25. A distribuição espacial da DMR está apresentada em função da locação das linhas de referências do *gride* de amostragem, considerando o gradiente de relevo do terreno.

Observa-se que houve uma tendência definida de aumento da densidade da massa de raízes, acompanhando a declividade natural do terreno. Este aumento foi consistentemente mantido em todas as datas de amostragem com as curvas mais distantes da curva de referência (ponto 0), tendendo a maiores valores. A magnitude das diferenças é de duas a três vezes, quando são comparados os valores correspondentes às curvas a 10 e 100m, como é visto na amostragem do mês de novembro, ou seja, 0,59 vs. 1,44 g anel (Figura 24).

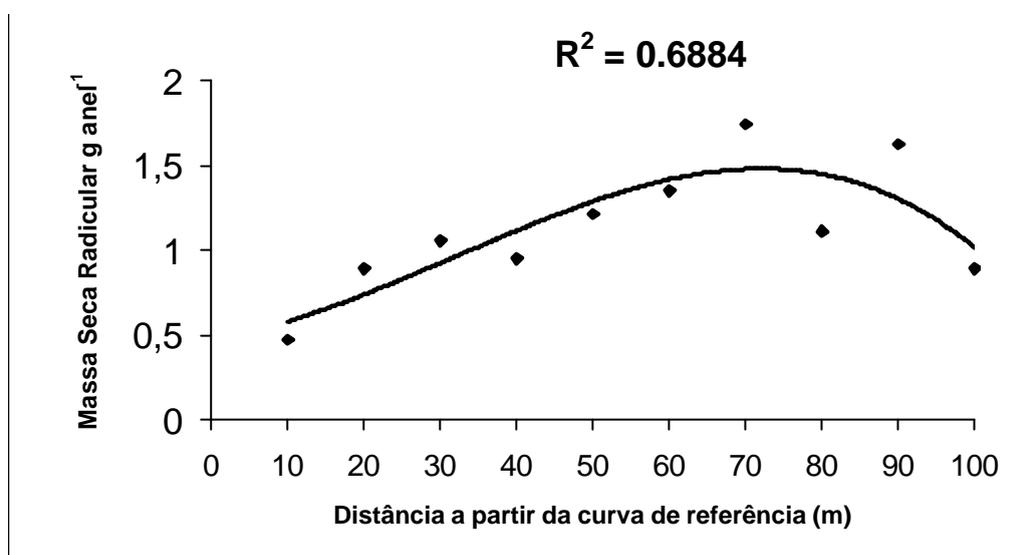


Figura 23. Variação da massa seca radicular de *Brachiaria humidicola* em função do relevo no mês de Setembro de 2001, na profundidade 0-0,1m.

Por outro lado, embora em todos os casos a distribuição amostral ajustou-se a um modelo cúbico, é possível observar certa flutuação nos valores, especialmente entre a 1ª e 2ª época de coleta, onde os máximos valores de densidade ocorreram a diferentes distâncias da curva de referência (Figura 23 e 24).

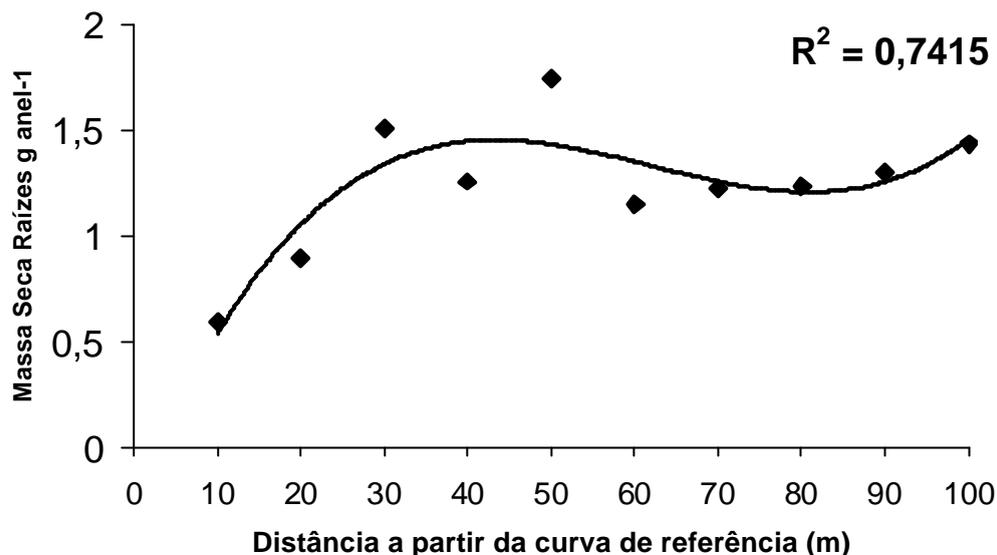


Figura 24. Variação da massa seca radicular de *Brachiaria humidicola* em função do relevo no mês de novembro de 2001, na profundidade 0-0,1m.

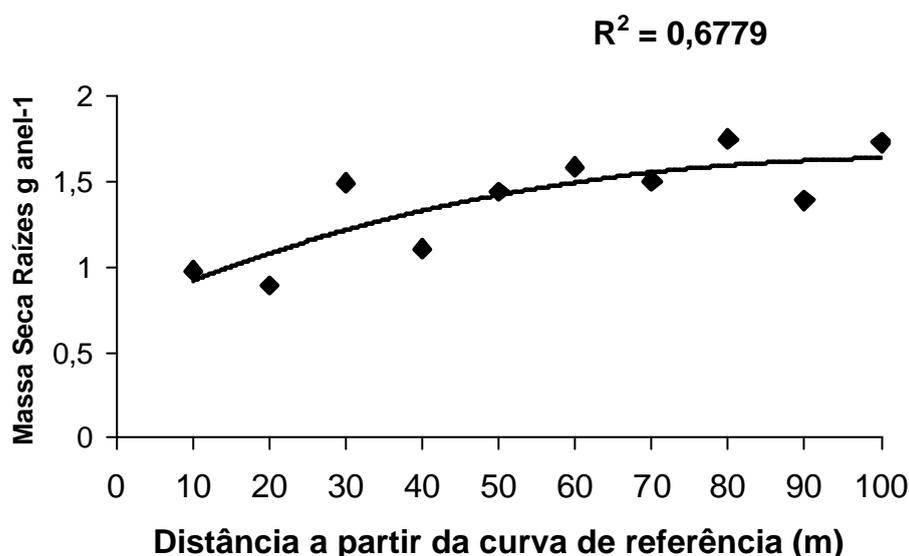


Figura 25. Variação da massa seca radicular de *Brachiaria humidicola* em função do relevo no mês de Janeiro 2002, na profundidade 0-0,1m.

Esses resultados podem ser explicados pela interação entre a própria variabilidade amostral e as flutuações nas condições ambientais entre as épocas de amostragem, principalmente com relação à água em interação com as feições topográficas do terreno.

Estes dados comprovam a interferência definida do relevo discutida no item anterior a partir dos semivariogramas direcionais, com os valores menores distribuídos na cota mais alta, e os maiores nas partes mais baixas do terreno, acompanhando gradientes previsíveis de nutrientes e umidade disponível. Todas estas tendências foram mantidas para os valores obtidos na profundidade 0,1-0,2 m, porém o modelo polinomial resultou mais bem ajustado na primeira profundidade.

Os resultados na Tabela 35 mostram que o CV% em ambas as coletas esteve contido em uma faixa relativamente esperada, oscilando entre 20 e 60 %.

Tabela 35. Valores de coeficiente de variação por profundidade e por ponto de referência no relevo nas diferentes épocas de amostragem.

POSIÇÃO NO RELEVO	VALORES de CV %		
	Set - 2000	Nov -2000	Jan - 2001
	Profundidade 0-0,1 m		
Linha 1 (P 0)	38,15	46,95	55,70
Linha 2	39,08	52,67	65,60
Linha 3	32,03	47,72	28,69
Linha 4	20,97	48,86	44,96
Linha 5	19,56	49,68	47,14
Linha 6	40,27	35,43	54,62
Linha 7	25,72	23,66	46,27
Linha 8	48,52	56,40	60,43
Linha 9	38,68	50,53	38,93
Linha 10 (100m)	32,87	52,93	60,40
CV % Médio	33,59	46,49	50,28
	Profundidade 0,1-0,2 m		
Linha 1 (P0)	90,11	78,41	71,58
Linha 2	42,74	54,75	77,72
Linha 3	36,78	34,34	61,01
Linha 4	32,97	61,00	51,68
Linha 5	30,99	39,27	52,13
Linha 6	41,99	40,92	52,64
Linha 7	29,07	71,79	59,73
Linha 8	38,42	75,49	41,63
Linha 9	35,97	35,54	41,31
Linha 10 (100m)	47,80	67,57	26,24
CV % Médio	42,68	55,91	54,27

Porém estes valores de CV pareceram oscilar aleatoriamente entre curvas, sem relação aparente com a topografia do local, e a variabilidade dentro de curvas ora foi da mesma ordem, ou em alguns casos, esta variabilidade foi maior, corroborando com os resultados obtidos anteriormente (Figuras 18 e 20) sobre o padrão anisotrópico dos semivariogramas direcionais para a DMSR desta pastagem.

Na profundidade 0,1-0,2 m, houve uma redução significativa dos valores de CV%, em resposta ao aumento da massa de raízes no gradiente de relevo. Este resultado é interessante, pois a relação entre a diminuição do CV% da densidade radicular nas camadas superiores do solo, também ocorre a favor do gradiente da densidade de raízes (Bengough et al., 2000). Os valores de CV médio nesta camada mostraram-se ligeiramente superiores ao da profundidade 0-0,1m. Nesta análise foi detectado ligeiro aumento do CV em função da época em ambas as profundidades, configurando um quadro de variabilidade temporal já revelado pelos valores de CV% experimentais (levando em consideração os 100 valores de densidade da massa seca radicular).

Estes resultados sugerem, que em adição aos estudos de dependência espacial, a variável relevo deve ser bem estudada, uma vez que este fator determina valores aparentemente repetíveis no tempo estudado.

5.4 CONCLUSÕES

Os dados da densidade da massa seca radicular da pastagem de *Brachiaria humidicola* não apresentaram distribuição normal nas diferentes épocas e profundidades de amostragem avaliadas.

A hipótese de aleatoriedade dos dados de distribuição do sistema radicular foi rejeitada para a pastagem estudada.

Existe dependência espacial para os valores da densidade radicular da *Brachiaria humidicola*, demonstrando haver manchas de massa seca de raízes maiores e menores em pontos distintos do terreno, com valores médios de alcance de $27,98 \pm 3,46$ metros.

A variação na densidade radicular de *Brachiaria humidicola* foi influenciada pela posição no gradiente do relevo.

6. CAPÍTULO IV

**APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DO MINIRHIZOTRON E DA
ENDOSCOPIA DIGITAL, EM APOIO AO ESTUDO DA
VARIABILIDADE ESPACIAL DE CARACTERÍSTICAS
RADICULARES DE GRAMINEAS FORRAGEIRAS.**

RESUMO

Foi realizado um estudo na Universidade de Évora, para estudar a variabilidade dos dados da distribuição vertical da morfologia do sistema radicular do *Lolium multiflorum*, cultivado na região sul de Portugal. Também se objetivou estudar as potencialidades da moderna tecnologia do minirhizotron acoplado a endoscopia digital, para a geração de um protocolo de trabalho de obtenção de informações complementares sobre variabilidade das raízes *in situ* em amostras indeformadas. Esta gramínea foi cultivada como forrageira de inverno (outubro de 2003 a julho de 2004) em um solo Mediterrâneo pardo não calcário (Pm) classificado como Vertic Luvisol (FAO-Unesco,1988). Este solo foi selecionado, por apresentar sérias limitações ao uso agrícola. No estudo da variabilidade espacial das raízes, foi utilizado o método do monolito pneumático para a extração de volumes de solo+raiz de $0,5 \text{ dm}^3$ correspondentes a camadas de 0,1 m, sendo retiradas amostras até a profundidade de 0,7 m. Após a coleta, as amostras foram separadas do solo através de uma máquina de lavar raízes “Sistema de Elutriação Pneumático”. As raízes foram recuperadas e quantificadas pelo comprimento total e a massa seca radicular, para o cálculo da densidade radicular em m e g dm^3 . Para o estudo com o minirhizotron, na segunda quinzena de novembro, foram instalados 6 tubos de acrílico com 6 cm e 5,2 cm respectivamente de diâmetro externo e interno e 100 cm de comprimento. Os tubos foram instalados com um ângulo de inserção de 30° em profundidade ao plano vertical; para evitar o crescimento preferencial das raízes na interface solo – tubo, atingindo em média 0,55 m de profundidade. Para gerar o protocolo de estudo foram utilizadas imagens digitais capturadas com auxílio de um endoscópio digital “Bartz colour camera system”. As imagens foram captadas em diferentes profundidades, ao longo de toda a extensão do tubo e distantes 1,34 cm entre si. Nestas seqüências de imagens, foram realizados estudos de parâmetros visuais para a avaliação das respostas pontuais e do potencial de extração de atributos quantitativos das imagens. Pela a análise destrutiva pode-se observar, que em média mais de 80% do comprimento e 75% da massa das raízes se concentraram nos primeiros 0,1 m de profundidade, não tendo ultrapassado os 0,5-0,6 m. Apenas 7,08 % do comprimento e 6,93 % da massa radicular se distribuíram nas profundidades abaixo de 0,2 m, sendo que na profundidade 0,5-0,6 m só foi encontrado 1% do comprimento total e a massa das raízes não foi registrada. A variabilidade dos dados aumentou contra o gradiente de densidade radicular a partir da profundidade 0,1 m, com valores superiores para o comprimento radicular. A distribuição vertical da densidade foi bem ajustada pela função exponencial decrescente ($R^2 > 0,95$) para ambos os parâmetros avaliados, seguindo um padrão de redução em profundidade. A análise da endoscopia digital também revelou a maior concentração de raízes nos 0,1m superficiais do solo, e a redução das raízes em profundidade. Foram extraídas várias informações das imagens, a partir do arranjo espacial das raízes desde a germinação, e de alterações da morfologia radicular, tais como, o aumento do diâmetro e a curvatura das raízes em camadas compactadas, e a proliferação de pelos radiculares, que não são detectados pelo método destrutivo. Estas informações podem ser de suma importância para auxiliar aos estudos da sustentabilidade do ecossistema pastoril.

Palavras chave: Dinâmica radicular, análise de imagens, *Lolium multiflorum*.

ABSTRACT

A study was conducted at the Évora University to study the variability of vertical distribution of the root system morphology of *Lolium multiflorum*, cultivated in the South of Portugal. The potential of the new technology of minirhizotron, coupled with digital endoscopy, was also evaluated, to create a protocol to obtain complementary information about root variability *in situ* in non-disturbed samples. This grass was cultivated as a winter forage (October 2003 from July 2004) in a brown non calcareous Mediterranean soil (Pm) classified as Vertic Luvisol (FAO-Unesco, 1988). This soil has serious limitations for agricultural usage. In the study of root spatial variability, the pneumatic monolith method was used for extraction of soil+root volumes of 0.5 dm^3 corresponding to layers of 0.1m, and samples were taken until 0.7 m depth. Root samples were separated from the soil in a root washing machine. Root length and mass were quantified, and root density was calculated. In the minirhizotron study, in the third week of November, six acrylic tubes were installed, with 6 cm and 5.2 cm of external and internal diameters, respectively, and 100 cm of length. The tubes were installed with an insertion angle of 30° relative to the vertical plane, to avoid the preferential root growth in the soil – tube interface, reaching in average 0.55 m depth. The digital images were acquired by a digital endoscop “Bartz colour camera system”. The images were acquired in different depths, across the whole tube length, with a distance of 1.34 cm among them. In these images, visual parameters for evaluating local responses were studied, and the potential for extraction of quantitative attributes from the images was evaluated. Destructive analysis showed that in average more than 80% of root length and 75% of root mass were found in the 0-0.1 m layer; roots did not reach more than 0.6 m. Only 7.08 % of root length and 6.93% of root mass was found in layers deeper than 0.2 m, and in the 0.5-0.6 m depth only 1% of total root length, and no root mass, was found. Data variability increased against the root density gradient after the 0.1 m depth, with superior values to root length. Vertical distribution of root density was adjusted by a decreasing exponential function ($R^2 > 0.95$) for every parameter, following a pattern of reduction with depth. Digital endoscopy also revealed a higher root concentration in the 0-0.1 m depth, and the reduction of roots in deeper layers. Much information was extracted from the images, about the spatial root arrangement since germination, and about modifications of root morphology, such as the increase in diameter and root curvature near compact layers, and root hair proliferation, that were not detected by the destructive method. This information can be of great importance to improve studies about the sustainability of pasture ecosystems.

Keywords: Root dynamics, image analysis, *Lolium multiflorum*.

6.1 INTRODUÇÃO

Devido à relativa inacessibilidade do sistema radicular como objeto de estudo, são necessárias técnicas especiais para a investigação da quantidade, da variabilidade, do “turnover” e do balanço de carbono no ambiente edáfico (Vogt et al., 1998; Bengough et al., 2000; Hooker et al., 2000). Tradicionalmente, as técnicas destrutivas, tais como as do anel volumétrico (*Soil core*), monolito, anéis de crescimento (*in-growth cores*), a escavação do sistema radicular e a abertura de trincheiras, têm sido as mais utilizadas na investigação da morfologia radicular (Vogt et al., 1998; Oliveira et al., 2000; Van Noordwijk et al., 2000; Brasil et al., 2002).

Estas técnicas fornecem importantes informações sobre as avaliações quantitativas da morfologia radicular, uma vez que a amostra extraída exprime a real distribuição das raízes no volume de solo, sendo estes valores usados como padrões para a calibração dos demais métodos de análise qualitativa (Vogt et al., 1998). Entretanto, estes métodos pouco contribuem para o conhecimento sobre a dinâmica específica das raízes, em grande parte devido à alta variabilidade entre plantas e do próprio solo, já que não é possível nestas amostras perturbadas fazer avaliações *in vivo* e de forma contínua no tempo, de uma mesma raiz ou de uma mesma planta (Johnson et al., 2001). Outras limitações estão associadas à quantidade de trabalho, onde o número de observações tem de ser reduzido de forma a otimizar a obtenção das informações, e as várias dificuldades práticas, onde muitas vezes é necessária a movimentação de grandes volumes de solo para reduzir a alta variabilidade obtida em estimativas baseadas na densidade radicular (Brasil, 2001).

De forma complementar os métodos destrutivos podem ser combinados com técnicas de processamento digital de imagens para a quantificação da morfologia radicular (Ritchner et al., 2000). Atualmente existem alguns programas computacionais privados e de domínio público que podem ser utilizados na extração de atributos da geometria radicular a partir de uma imagem digital (Brasil, 2001). Os métodos de digitalização de raízes podem ser variados, podendo as imagens ser obtidas diretamente no campo, na parede do perfil, com auxílio de câmera de filmar e/ou câmara digital, ou a partir de raízes separadas do solo por lavagem e digitalizadas através de scanner de mesa (Ritchner et al., 2000; Brasil et al., 2001). No entanto, estes métodos são limitados, de uma forma ou de outra, por trabalharem com as amostras deformadas, não representando a variabilidade e o arranjo espacial *in loco*.

O método do minirhizotron acoplado a câmaras de vídeo coloridas e a tecnologias digitais tem sido apresentado como uma ferramenta poderosa, para os estudos de variação temporal e, sobretudo da dinâmica das raízes finas em condições naturais de crescimento (Smit et al., 2000; Johnson et al., 2001). Estas imagens podem contribuir para o conhecimento da aparência, da coloração, dos eixos radiculares e suas ramificações laterais. A partir destas informações, a eficiência de absorção de água e nutrientes e as respostas das raízes em interação com o ambiente edáfico podem ser melhor compreendidas e previstas (Ferguson & Smucker, 1989).

De forma simplificada, a metodologia consiste na obtenção de imagens de raízes que se distribuem no solo em interface com um tubo transparente instalado com ângulo que pode variar de 30 a 45° em relação ao perfil de enraizamento. Johnson et al. (2001) apresentaram de forma mais detalhada numa revisão recente, as inúmeras informações relacionadas aos avanços desta metodologia. As imagens são gravadas com auxílio de uma câmara de vídeo acoplada a um endoscópio, permitindo registrar em profundidade,

um conjunto de raízes e pêlos radiculares, “cluster” de raízes (“cohort”) ou um único eixo radicular (Dawson et al., 2003).

Não obstante os avanços verificados na metodologia baseada no uso do minirhizotron, é escassa a investigação aplicada a estudos em pastagens, principalmente nos ecossistemas tropicais e subtropicais (Brasil et al., 2004). Esta carência de dados sugere que nos diferentes sistemas de produção e condicionantes pedoclimáticos ainda se verifica uma grande lacuna em termos de informação (Jonhson et al., 2001).

Este método tem sido apontado na literatura como método complementar, e não um substituto dos demais, tornando-se indispensável à combinação de suas informações com as obtidas pelos métodos destrutivos de solo+raízes. Isto deve ser feito com o objetivo de obter correlações, entre os parâmetros estimados a partir das medições no tubo com os valores reais (de ordem quantitativa), estimados no ambiente edáfico (Majdi et al., 1992; Brasil et al., 2004). Inúmeros trabalhos têm apresentado baixos coeficientes de correlação entre os valores obtidos por estes diferentes métodos (Higgins et al., 2002; Machado e Oliveira, 2003), sugerindo que algumas precauções devem ser tomadas consoante às suas limitações, e novas pesquisas devem ser encorajadas com o objetivo de gerar outras informações que colaborem com o conhecimento de suas aplicações.

O objetivo deste trabalho foi estudar a variabilidade dos dados da distribuição vertical da morfologia do sistema radicular de uma gramínea temperada “*Lolium multiflorum*”, cultivada na região sul de Portugal.

Também foi objetivo estudar as potencialidades da moderna tecnologia do minirhizotron acoplado a endoscopia digital, de forma a gerar um protocolo de trabalho para a obtenção de informações complementares sobre variabilidade das raízes *in situ* em amostras indeformadas.

6.2 MATERIAL E MÉTODOS

6.2.1 Localização do experimento.

O experimento foi conduzido em uma área com dimensão de 11,802 m², pertencente à Estação Experimental da Direção Regional de Agricultura do Alentejo de Portugal, localizada a 38° 31' N e 7° 47' W e com uma altitude de 230 m, onde está instalada a estação climatológica de Évora-currais distante cerca 25 km do Departamento de Fitotecnia da Universidade de Évora.

As análises referentes à quantificação das características radiculares foram realizadas no Laboratório de Física de Solos no Departamento de Fitotecnia e no Laboratório de Hidráulica Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade de Évora.

6.2.2 Clima

O clima local enquadra-se num clima Cs subtropical seco, também denominado mediterrânico, incluído nos climas temperados (Feio, 1991), que varia do árido ao semi-árido, até um clima semi-úmido. Nesta classificação o Clima Mediterrâneo é definido como sendo um clima onde o mês mais seco deve ter precipitações inferiores a 1/3 das verificadas no mês mais chuvoso, onde o volume destas precipitações deve ser inferior a 30 mm. Desta forma as regiões com predominância deste regime climático como é o caso do Alentejo, estão sujeitas a algumas limitações nas atividades agrícolas, pois além do volume total anual das precipitações ser de apenas 567.14 mm (Tabela 36), estas chuvas concentram-se de forma irregular e com grande amplitude de variação nos meses de outubro a março correspondendo as estações do outono e inverno.

Tabela 36. Normais climatológicas da Região do Alentejo no Sul de Portugal Estação Experimental de Évora currais (Ano Agrícola 2003-2004).

Mês	T Máx °C	T Min °C	T Média °C	Precip. Total mm mês ⁻¹	Precip Máx diária mm dia ⁻¹	Evap mm mês ⁻¹
Out	23,1	11	17	59,1	49	154,6
Nov	17,4	6,9	12,2	69,6	33,4	84,3
Dez	14	4,3	9,2	75,4	40,2	58,6
Jan	13,6	4	8,8	80,7	30,4	53,8
Fev	14,4	4,8	9,6	79,5	28,5	62,8
Mar	16,8	5,7	11,2	73	20,4	87,1
Abril	19,6	7	13,3	44	29,5	119,5
Mai	23,9	9,7	16,8	36	31,5	173,8
Junho	28,4	12,7	20,6	25,1	19,7	282,2
Julho	32,3	14,5	23,4	3,3	12,5	324,5
Agost	32,2	14,4	23,3	2,4	8,7	323,2
Setem	29	13,4	21,2	19,3	26,7	238,6
Anual	42.3	-5.6	15.6	567.4	49	1963.0

Fonte: I. N. M. G., 1991.

As estações da primavera e verão são caracterizadas por baixas ou ausência de precipitações, associadas a elevadas temperaturas, sendo esta escassez acentuada a partir de meados da primavera (Abril). Como a conjugação calor/umidade é um dos principais fatores de crescimento das plantas, o desencontro destes elementos neste tipo de clima, esteriliza a estação de maiores temperaturas por falta de umidade nos horizontes superficiais do solo (Feio, 1991).

6.2.3 Solo

O solo predominante da área experimental é classificado como Mediterrâneo pardo não calcário (Pm) de um material de origem proveniente de quartzodioritos, tonalites e gnaisses segundo a Classificação de Cardoso (1965), sendo classificado como Vertic Luvisol segundo a correlação com a chave de classificação de solos da FAO-Unesco (1988).

Este solo foi escolhido para esta pesquisa, por apresentar sérias limitações ao uso agrícola, em função de alterações sazonais em suas propriedades físicas (contração e expansão das argilas 2:1, rachaduras, etc.), que acentuam ainda mais os problemas de penetração e dinâmica do sistema radicular das culturas, principalmente as herbáceas, além da baixa disponibilidade de água nos horizontes superficiais, contribuindo para a rápida degradação e morte das culturas após o período da primavera e início do verão (Figura 26). Além de abranger as áreas planas de maior expressão e aptidão para a produção de cereais e forragens de outono-inverno no Alentejo (Alves, 1989).



Figura 26. A) Aspectos visuais do perfil do solo mediterrânico na caracterização do Perfil cultural (período seco). B) Detalhe das rachaduras e formação de estruturas devido às propriedades vérticas do solo, total ausência de raízes vivas no horizonte sub-superficial.

Uma descrição detalhada dos perfis estudados por Cardoso (1965) nesta mesma área, é apresentada no anexo deste trabalho.

6.2.4 Gramínea estudada

Foi utilizado um cultivo do azevém anual *Lolium multiflorum* Lam. variedade Pollanum para a produção de forragem de outono-inverno, já que esta espécie devido à alta sensibilidade ao déficit hídrico, está limitada em condições de sequeiro, às produções de inverno e início da primavera (Melo, 1985; Timóteo, 1999).

A densidade de plantio foi a recomendada para a região por diversos autores e produtores de sementes ($38,25 \text{ kg ha}^{-1}$ de sementes viáveis) (ANSEME, 1991; 1996.).

6.2.5 Implantação do experimento.

O plantio da forragem foi realizado no dia 08 de outubro de 2003, após o preparo do solo que foi feito por mecanização no sistema tradicional, com escarificação e gradagem cruzada.

Na segunda quinzena de novembro, foram instalados 6 tubos de minirhizotron em acrílico com 6 cm e 5,2 cm respectivamente de diâmetro externo e interno e 100 cm de comprimento (Bartz, 1999; Dawson et al., 2003).

Os tubos foram instalados com um ângulo de inserção de 30° em profundidade ao plano vertical, para evitar o crescimento preferencial das raízes na interface solo – tubo (Bragg et al., 1983). Os tubos atingiram em média 55 cm de profundidade. Após a sua inserção no solo a parte exterior do tubo foi coberta com uma tampa de PVC branco, de forma a evitar a entrada de luz e de água no seu interior. Na base de cada tubo foi colocada uma proteção de borracha para evitar a formação de rachaduras na superfície de contacto do solo com o tubo.

6.2.6 Métodos de estudo

Para o estudo da variabilidade espacial das raízes pelo método destrutivo, foram coletados volumes de solo+raiz. Para tal foi utilizado o método do monolito pneumático

(Cobra company ®) (Figura 27), sendo retiradas colunas de solo até a profundidade de 0,7 m. Destas colunas foram retiradas seções de 0,1 m com um volume de 0,5 dm³. Esta amostragem foi realizada no dia 11 de março de 2004.



Figura 27. Detalhe do amostrador volumétrico pneumático para coleta de amostras de solo+raiz (monolito).

O componente técnico utilizado para a geração do protocolo de estudo de imagens de raízes pela endoscopia digital, foi o sistema avançado de captação de imagens digitais do minirhizotron “Bartz colour camera system” (Bartz technology, Santa Barbara, CA, 2000) (Figura 28), que permite obter continuamente e de forma não destrutiva as imagens digitais de raízes, de alta qualidade (755 x 486 pixels) do interior do ambiente edáfico. Esta câmera digital é especializada e pode ser abaixada no tubo a profundidades e ângulos controlados pelo operador para capturar imagens das raízes que crescem na interface solo-tubo. Após a captura as imagens foram transferidas (cap transfer) para um computador do Laboratório e a seguir foram analisadas pelo software Root Tracker 2.0 © (Duke University, 2003).

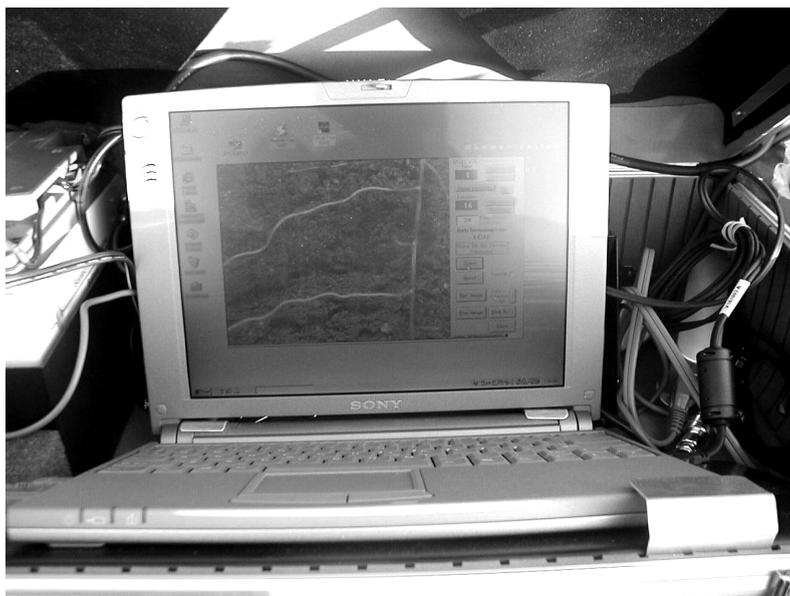


Figura 28. Detalhe do computador portátil (Sony VAIO, running Windows 98) ligado à sonda do endoscópio no momento do registro de uma imagem no campo experimental (março de 2004).

Imagens digitais de raízes foram captadas em diferentes profundidades, ao longo de toda a extensão do tubo e distantes 1,34 cm entre si, em diferentes épocas a partir de novembro de 2003. Nestas seqüências de imagens, foram realizados estudos de parâmetros visuais para a avaliação das respostas pontuais e do potencial de extração de atributos quantitativos das imagens.

6.2.7 Processamento das amostras de solo+raiz

Após a extração do volume de solo + raiz, as raízes foram separadas através de uma máquina de lavar raízes ‘Sistema de Elutriação Pneumático’ (Hydropneumatic elutriation system) (Smucker, et al., 1982), que permitiu lavar 8 amostras de 500 cm³ a cada 30 minutos, sendo estas recuperadas em peneira de 0,25 mm.

As raízes lavadas e recuperadas foram transferidas para bandejas plásticas (260 x 380 mm) para a quantificação no laboratório. Nas amostras provenientes das camadas superiores do perfil (0-0,2 m), foram separadas as impurezas. Os eixos radiculares foram separados com auxílio de uma tesoura, e conservadas em solução alcoólica a 30 % e refrigeradas em geladeira a uma temperatura de 5 °C, até que fossem definitivamente processadas (Oliveira et al., 2000).

Para a determinação da densidade do comprimento radicular (comprimento m volume da amostra⁻¹), foi utilizado um medidor fotoelétrico em forma de prato, com alta capacidade de medição e de resolução, sendo os valores obtidos em metros de raízes com 0,01 m de precisão.

Após esta quantificação, as raízes foram secas em estufa 65°C por 48 h e posteriormente pesadas em balança analítica com precisão de 0,1 mg.

6.2.8 Análise dos resultados

Na avaliação do minirhizotron, foram selecionadas algumas imagens em função da profundidade do solo, segundo aspectos visuais e atributos qualitativos das imagens e do ambiente edáfico para ilustrar o potencial do método.

Para tal foi criado um protocolo de análise seguindo os itens a descritos a seguir:

- Presença ou ausência de raízes;
- Presença ou ausência de pêlos radiculares;
- Ramificações e ordem;
- Presença ou ausência de raízes mortas ou moribundas (em algum estágio de envelhecimento ou decomposição).
- Deformações ou alterações morfológicas das raízes (exemplo compactação);
- Presença de minerais primários;
- Presença de resíduos de culturas anteriores ou de infestantes nas camadas superficiais do solo;
- Presença de água, poros ou rachaduras (condições físico-hídricas);
- Presença de organismos edáficos (Fauna do solo).

Como ferramenta para a extração dos atributos morfológicos das imagens o software Root Tracker 2.0 © (Duke University, 2003), desenvolvido pelo Dr. David Tremmel foi testado, devido a sua compatibilidade com o sistema BTC.

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.3.1 Variabilidade dos dados de morfologia radicular

Na Tabela 37, são apresentados os resultados referentes aos valores médios e percentuais da densidade do comprimento ($m\ dm^{-3}$) e da massa seca radicular ($g\ dm^{-3}$), seguidos dos respectivos coeficientes de variação em função da profundidade de amostragem. Em média mais de 80% do comprimento e 75% da massa das raízes se concentraram nos primeiros 0,1 m de profundidade, não tendo ultrapassado os 0,5-0,6 m. Apenas 7,08 % do comprimento e 6,93 % da massa radicular se distribuíram nas profundidades abaixo de 0,2 m, sendo que na profundidade 0,5-0,6 m só foi encontrado 1 % do comprimento total e a massa nem foi registrada.

Tabela 37. Valores médios e percentuais de densidade do comprimento (DCR; $m\ dm^{-3}$) e da massa seca radicular (DMR; $g\ dm^{-3}$), e os coeficientes de variação em função da profundidade de amostragem (média de 6 repetições).

Profundidade	DCR $m\ dm^{-3}$	CV%	% no Total em Profundidade
0-0,1 m	314,7 ± 97,28	31	80,10
0,1-0,2 m	50,5 ± 32,64	65	12,88
0,2-0,3 m	17,03 ± 14,86	87	4,33
0,3-0,4 m	6,6 ± 7,8	112	1,68
0,4-0,5 m	3,5 ± 4,2	120	0,92
0,5-0,6 m	0,66 ± 1,64	245	0,15
0,6-0,7 m	0	0	0

Profundidade	DMR $g\ dm^{-3}$	CV%	% no Total em Profundidade
0-0,1 m	1,52 ± 0,32	21	75,25
0,1-0,2 m	0,35 ± 0,2	58	17,82
0,2-0,3 m	0,09 ± 0,04	55	3,96
0,3-0,4 m	0,04 ± 0,04	97	1,98
0,4-0,5 m	0,02 ± 0,02	99	0,99
0,5-0,6 m	0,00 ± 0,00	245	0
0,6-0,7 m	0,00 ± 0,00	-	0

Os valores dos coeficientes de variação demonstraram que a variabilidade dos dados tendeu a aumentar contra o gradiente de densidade radicular a partir da profundidade 0,1 m, sendo estes valores superiores para o comprimento radicular. Os altos valores de CV encontrados para as profundidades 0,4-0,5 e 0,5-0,6 m foram devidos em parte, a ausência de raízes em algumas repetições, onde foi adotado o valor 0 (zero), para representar a densidade radicular (Tabela 39).

A distribuição vertical da densidade de raízes foi bem ajustada pela função exponencial decrescente ($R^2 > 0,95$) para ambos os parâmetros avaliados (Figura 28 e 29), seguindo um padrão de redução em profundidade semelhante ao encontrado na gramínea tropical cultivada em um solo com propriedades completamente diferentes no Brasil (Capítulo I).

Esta alta concentração das raízes tanto em massa como em comprimento nas camadas superficiais do solo no período de inverno, que antecede ao período de seca nesta região, pode estar demonstrando em parte o porque esta espécie é considerada intolerante ao stress hídrico (Melo, 1985). O que faz desta gramínea uma espécie altamente dependente da água de irrigação após o início do período seco nesta região, pois em regime de sequeiro, ocorre a morte instantânea no verão por ausência de umidade na camada superficial do solo (Oliveira, 1988).

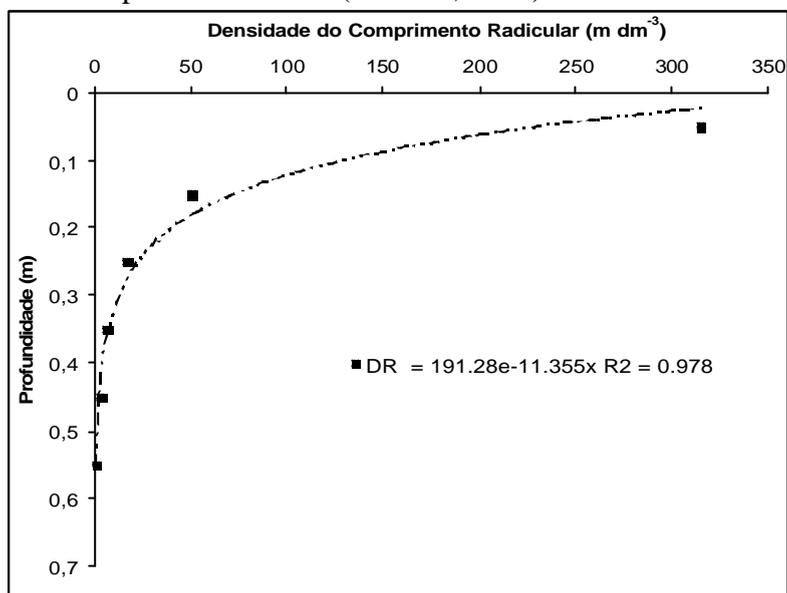


Figura 29. Distribuição vertical da densidade radicular do comprimento (m dm^{-3}) do azevém anual (valores médios de 6 repetições).

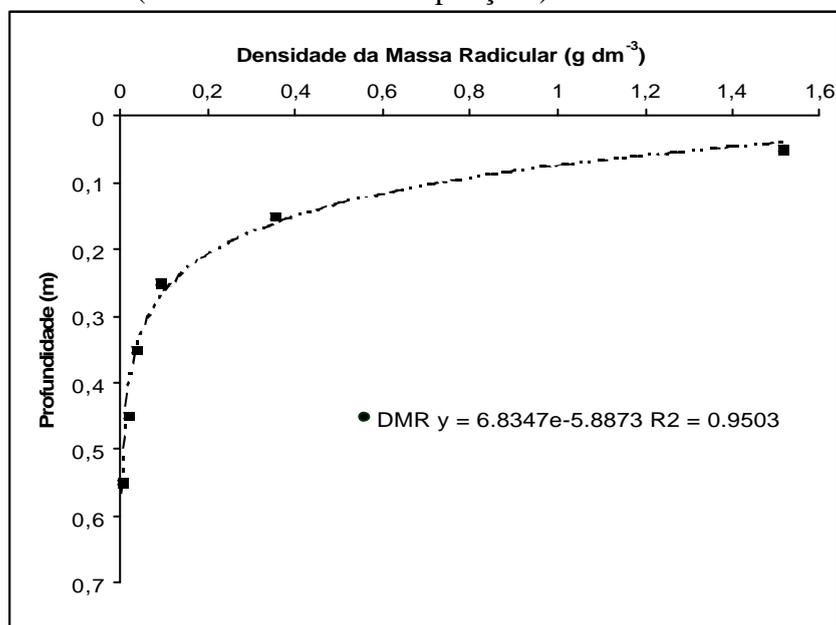


Figura 30. Distribuição vertical da densidade radicular da massa seca (g dm^{-3}) do azevém anual (valores médios de 6 repetições).

6.3.2 Imagens do minirhizotron

Em todos os 6 tubos estudados, houve um número significativamente maior de ramificações das raízes nos 0,1 m superficiais do solo, sendo que em profundidade foi observada uma redução no aparecimento das raízes, concordando com os resultados do

método destrutivo. O diâmetro das raízes variou de 0,2 a 0,5 mm, demonstrando uma total predominância de raízes finas em todas as camadas do solo avaliadas. O padrão de coloração das raízes foi sempre branco para as raízes vivas ou recém desenvolvidas na superfície do tubo principalmente neste registro durante o período de inverno, onde dificilmente foram observadas raízes em estágio de mortalidade. Foram detectados diferentes padrões de arranjo espacial das raízes em função da profundidade e das características observadas no solo.

A seguir são apresentados alguns resultados de imagens selecionadas, que representam uma síntese do potencial das informações, com o objetivo de ilustrar a qualidade das informações obtidas pela ferramenta da endoscopia digital, destacando os atributos utilizados pelo protocolo gerado na pesquisa e acima exposto.

Na figura 31 é apresentada uma imagem na primeira profundidade 1,34 cm, a poucos dias de germinação da semente (30 dias após plantio), esta distorção na imagem é por efeito do ângulo de instalação do tubo.



Figura 31. Germinação do *Lolium multiflorum* na camada superficial (± 2 cm). (18 mm(H) x 13,5 mm (V)), imagem obtida aos 30 dias após o plantio.

Na figura 32, é apresentada uma imagem a 0,1 m de profundidade, capturada no dia 23 de dezembro em pleno período de chuva, que demonstra um exemplo do padrão anisotrópico (em várias direções) do crescimento das raízes, com destaque para as bolsas de água em volta das raízes.



Figura 32. Destaque a anisotropia das raízes, a presença de água ($\pm 0.1\text{m}$ de profundidade em 23 de dezembro de 2003).

A imagem da figura 33 pode-se observar ainda em dezembro o crescimento das raízes em duas regiões muito próximas na profundidade 0,27 m. Pode-se destacar as raízes com crescimento retilíneo em direção a profundidade (Figura 33 A), e as raízes que cresceram em uma pequena camada compactada com curvaturas e um ligeiro engrossamento do diâmetro radicular (Figura 33 B)



Figura 33. A) Raízes com um bom acondicionamento do crescimento na interface solo-tubo. B). Destaque para alterações por efeito de compactação do solo.

Este efeito de compactação pode ser visto com maior destaque na figura 34, à profundidade de 0-0,4 m.

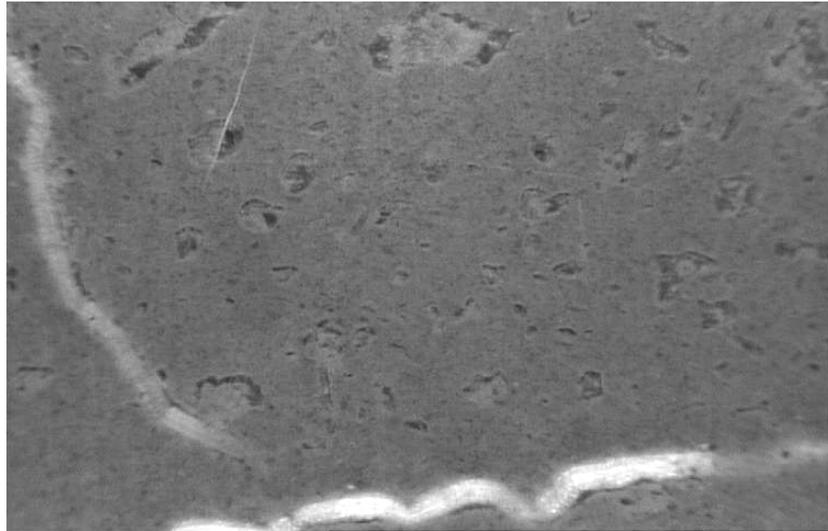


Figura 34. Horizonte compactado e alteração (curvatura) das raízes, com destaque para a alteração do diâmetro das raízes.

Na figura 35, pode-se visualizar o crescimento das raízes destacando os ápices radiculares voltados para diferentes direções (anisotropia). Devido a nitidez dos ápices das raízes, e a possibilidade de acompanhar o crescimento utilizando esta imagem como tempo 0, esta imagem apresenta-se com grande potencial para o estudo de dinâmica temporal.



Figura 35. Crescimento da região de alongação das raízes, destaque para o crescimento em diferentes direções (anisotropia).

A Figura 36 apresenta uma seqüência de quatro imagens referentes a camada 0,35-0,39 m do solo. Pode-se observar o crescimento do eixo principal em direção às camadas mais profundas, onde ocorre uma camada compactada do solo. No poro pode-se verificar um crescimento de um grande número de pelos radiculares (diâmetro $< 0,1$ mm) no espaço vazio do solo, o que pode ter ocorrido para aumentar a zona de absorção ou respiração das raízes. Este aumento na superfície via de regra não pode ser detectado pelos métodos destrutivos, já que todas as raízes são lavadas e separadas do solo por ação mecânica, ocorrendo grande perdas de raízes de diâmetro muito fino e pelos radiculares (Oliveira et al., 2000). Isto indica que os resultados de quantificação da área superficial e principalmente do comprimento radicular total podem estar sendo

subestimados. Nota-se que no início da quarta imagem, a raiz principal desvia para outra direção no solo.



Figura 36. Seqüência de quatro imagens ao longo do 1 tubo, destacando um cluster de pêlos radiculares em um poro. (Profundidade no Solo 0,35-0,39 m).

Na Figura 37 observa-se o desenvolvimento de pelos radiculares também na profundidade de 0,22 m, sendo nítida a presença de minerais primários (quartzo), o que é uma característica deste solo. Esta imagem se mostra muito boa para a extração de atributos quantitativos (diâmetro, comprimento), para o estudo da morfologia radicular.



Figura 37. Crescimento das raízes na profundidade 0,22 m, destaque para a presença de minerais primários.

Na Figura 38, é ilustrada a tela principal do programa “RooTracker”. Este programa computacional tem uma série de funções auxiliares para a análise digital, em especial a quantificação direta do diâmetro e do comprimento dos eixos radiculares na seqüência do registro da imagem, por data, hora, profundidade e tratamento. Pode-se ver na tela uma seqüência de imagens e executar as funções de medição ordenando as imagens pelo arquivo gerado no momento de registro da imagem no campo.

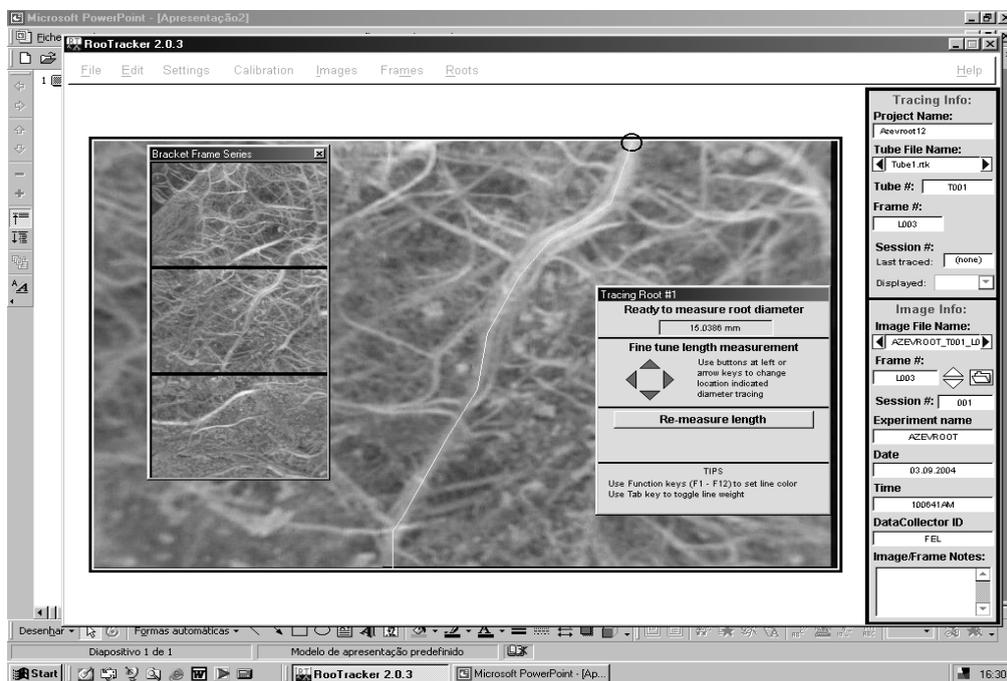


Figura 38. Tela principal do software Root Tracker 2.0 © (Duke University, 2003), para execução da medição do diâmetro do eixo radicular.

6.4 CONCLUSÕES

A distribuição vertical do *Lolium multiflorum* cultivado em um luvisolo de Portugal, apresentou uma alta concentração das raízes na camada superficial do solo (0,2 m), de forma similar ao encontrado para *Brachiaria humidicola* no Brasil.

A presença de um elevado número de pêlos radiculares de diâmetro muito pequeno ($< 0,1$ mm), pode estar sendo ignorada pelos métodos destrutivos, o que pode estar gerando uma subestimativa nos dados de densidade do comprimento radicular.

Do protocolo gerado pela pesquisa com a endoscopia digital e o minirhizotron surgem inúmeras informações que podem ser incorporadas na interpretação da dinâmica radicular em função das alterações edafoclimáticas, e desta forma, podem auxiliar os estudos da sustentabilidade do ecossistema pastoril.

7. CONCLUSÕES FINAIS

Os resultados deste trabalho confirmam várias afirmações feitas por pesquisadores que trabalham com estudos de raízes em todo o mundo. As maiores limitações dos estudos sobre o sistema radicular dos vegetais ainda são de natureza metodológica, estimulando inúmeras pesquisas para a viabilização de métodos que facilitem e tornem mais rápido o processo de obtenção de dados radiculares, no sentido de impulsionar os trabalhos sobre a interação solo - clima-raiz-parte aérea-animal em ecossistemas de pastagem.

A distribuição vertical das características radicular das pastagens demonstrou ser uma característica relevante para o entendimento das alterações temporais e variabilidade espacial das raízes.

A cuidadosa combinação das informações quantificadas através dos métodos destrutivos e do minirhizotron torna-se de grande importância para o avanço nos estudos do sistema radicular das plantas forrageiras e da sustentabilidade do ecossistema pastoril.

Os valores referentes às taxas de produção, mortalidade, longevidade e sobrevivência radicular, estimados a partir dos dados obtidos com o minirhizotron, devem ser aplicados para interpretações da fenologia e da demografia radical, enquanto que os valores obtidos pelos métodos destrutivos são indispensáveis para a quantificação pontual da densidade e da distribuição radicular.

Não obstante os avanços verificados na metodologia baseada no uso do minirhizotron, ainda é escassa a investigação aplicada a estudos em pastagens, principalmente nos ecossistemas tropicais e subtropicais. Esta carência de dados sugere que nos diferentes sistemas de produção e condicionantes pedoclimáticos ainda se verifica uma grande lacuna em termos de informação, o que deve estimular novas pesquisas nesta área.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J.A. Fertilidade de alguns solos e problemas dela decorrentes. Instituto nacional de Investigação Agrária, Lisboa, Agosto de 1989. 82p

ANGHINONI, I.; MEURER, E.J. Eficiência de absorção de nutrientes pelas raízes. In: Anais Workshop sobre sistema radicular: Metodologias e Estudo de Casos. M.F. FERNANDES; E.D. TAVARES; M. L. da S. LEAL (Ed.). Embrapa Tabuleiros Costeiros. Aracaju, 1999. p.57-87.

ANSEME. Comercialização de sementes certificadas de azevém anual e bianual (*Lolium multiflorum*), Campanhas de 1991 a 1996.

AYARZA, M.A.; RAO, I.M.; THOMAS, R.J.; FISHER, M.J.; LASCANO, C.E.; HERRERA, P.1994. Standing root biomass and root distribution in *Brachiaria decumbens*-*Arachis pinto* pastures under grazing. In: Proceedings of the XVII International Grassland Congress, 8-21 February 1993, vol. 3. Palmerston North, New Zealand, p.1921.

ATKINSON, D. Root characteristics: Why and what to measure. In: SMIT, A.L.; BENGOUGH, A.G.; ENGELS, C.; VAN NOORDWIJK, M.; PELLERIN, S.; VAN DE GEIJN, S.C. (Eds) Root methods: a handbook. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, p.305-341. 2000.

BARTZ TECHNOLOGY CORPORATION. Video system design and manufacture: Products and Services. Santa Barbara CA, EUA. Copyright February 1999. <http://www.bartztechnology.com/products.htm>

BARTZ TECHNOLOGY CORPORATION. Operation manual BTC Minirhizotron Camera systems. Santa Barbara CA, EUA. Copyright March 2000.

BASSOI, L.H.; FLORI, J.E.; ALENCAR, C.M.; SILVA, J.A.M.; RAMOS, C.M.C. Distribuição espacial do sistema radicular da pupunheira em solos irrigados no vale do São Francisco. Engenharia Agrícola. Jaboticabal, v.19, n°2, p. 163-176, 1999.

BENGOUGH, A.G.; CASTRIGN, A.; PAGÉS, L.; VAN NOORDWIJK, M. Sampling strategies, scaling and statistics. In: SMIT, A.L.; BENGOUGH, A.G.; ENGELS, C.; VAN

NOORDWIJK, M.; PELLERIN, S.; VAN DE GEIJN, S.C. (Eds) Root methods: a handbook. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, p.147-174, 2000.

BENGOUGH, A.G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques of root growth response. *Journal Soil Sci.*, v.41, p.341-358, 1990.

BODDEY, R. M & VICTORIA, R. L. Estimation of biological nitrogen fixation associated with *Brachiaria* and *Paspalum* grasses, using ¹⁵N-labelled organic matter and fertilizer. *Plant Soil*. V. 90, p.265-292, 1986.

BODDEY, R. M.; RAO, I. M.; THOMAS, R. J. Nutrient cycling and environmental impact of *Brachiaria* pastures. In: *Brachiaria: biology, agronomy, and improvement*. (Eds.) MILES, J. W.; MAASS, B. L.; VALLE, C. B.; With the collaboration of KUMBLE, V. CIAT, Cali, Colômbia, 1996. 288 p

- BODDEY, R.M.; RESENDE, C.P.; SCKUNKE, R.M.; ALVES, B.J.; CADISH, G.; PEREIRA, J.M. Sustentabilidade de pastagens consorciadas e de gramíneas em monocultura: o papel chave das transformações de nitrogênio. In: Simposio sobre o meio ambiente, os recursos naturais e a produção animal. S. ARANOVICH; J.T. SEIXAS FILHO; J.E. THOMAS; R.R.S. OLIVEIRA (Ed.). Sociedade brasileira de zootecnia, 30ª Reunião Anual. Rio de Janeiro, R.J, p. 141-173, 1993.
- BOHM, W. Methods of studying root systems. New York, Springer-Verlag, 1979. 194p.
- BONDE, T.A.; CHRISTENSEN, B.T. & CERRI, C.C. Dynamics of soil organic matter as reflected by natural ¹³C abundance in particle size fractions of forested and cultivated oxisols. *Soil Biology and Biochemistry*. 24:275-277, 1992.
- BRASIL, F. C. Estudo de características radiculares de uma pastagem de *Brachiaria humidicola* com auxílio de análise digital de imagens. Tese de Mestrado. UFRRJ, Seropédica, 2001.
- BRASIL, F.C.; ROSSIELLO, R.O.P. & OLIVEIRA, M.R.G. Dinâmica radical de gramíneas forrageiras: aplicação de novas metodologias. Actas das comunicações do Seminário Conservação do solo e da água em regadio: Investigação, Experimentação e Divulgação. Instituto Politécnico de Beja, Portugal, p.49-61, Dezembro de 2003. ISBN: 972-778-075-X
- BRAGG, P.L.; GOVI, G. & CANNEL, R.Q. 1983. A comparison of methods, including angled and vertical minirhizotrons, for studying root growth and distribution in a spring oat crop. *Plant and Soil*, V.73, p.435-440.
- BRASIL, F. C.; ROSSIELLO, R. O. P.; PACIORNIK, S.; ABREU, J. B. R. Distribuição vertical de características morfológicas do sistema radical de *Brachiaria humidicola* Pasturas Tropicais, Colômbia, v. 24, n. 3, p. 14-20, 2002
- BURROUGH, P.A. Soil variability: a late 20th century view. *Soil Fertil.*, v.56, p. 529-562, 1993.
- BUSHBY, H.V.A.; VALLIS, I. & MYERS, R.J.K. Dynamics of C in a pasture grass (*Panicum Maximum* var. *Trichoglume*). Soil system. *Soil Biology Biochemistry*. 24: Nº 4 pp. 381-387, 1992.
- CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F. & KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa Soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 58:p.1501-1511, 1994.
- CAMPBELL C.D., MACKIEDAWSON L.A., REID E.J., PRATT S.M., DUFF E.I., & BUCKLAND S.T. Manual Recording of Minirhizotron Data and Its Application to Study the Effect of Herbicide and Nitrogen Fertiliser on Tree and Pasture Root Growth in a Silvopastoral System. *Agroforestry Systems*, v. 26(2), p.75-87, 1994.
- CANELLAS, L.P. Avaliação de características físico-químicas de ácidos húmicos. Tese de doutorado. UFRRJ, Seropédica, 2000. 164 p.
- CANTARUTTI, R.B.; FONSECA, D.M.; SANTOS, H.Q.; ANDRADE, C.M.S. Adubação de pastagens – uma análise crítica. In: OBEID, J.A.; PEREIRA, O.G.; FONSECA, D.M.; NASCIMENTO JUNIOR, D. Anais do simpósio sobre manejo estratégico da pastagem. Viçosa, MG, p.43-84, 2004
- CARDOSO, J.V.J.C. Solos de Portugal: Sua classificação, caracterização e genese; 1- A sul do rio tejo. Secretaria de Estado de Agricultura, Lisboa, 1965. 311p.

- CECATO, U.; JOBIM, C.C.; REGO, F.C.A.; LENZI, A. Sistema radicular – componente esquecido das pastagens. In: OBEID, J.A.; PEREIRA, O.G.; FONSECA, D.M.; NASCIMENTO JUNIOR, D. Anais do simpósio sobre manejo estratégico da pastagem. Viçosa, MG, p.159-207, 2004
- CERRI, C.C & MORAES, J.F.L. Conseqüências do uso e manejo do solo no teor de matéria orgânica. In: Guerrini I.A. (Ed) Encontro sobre matéria orgânica do solo: Problemas e soluções. Botucatum, 1992. 203p
- CERRI, C.C; ANDREUX, F. & EDUARDO, B.P. O ciclo do carbono no solo. In: CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S. M. & NEVES, M.C.P. Microbiologia do solo. Campinas, Soc. Bras. Ciência do Solo. pp 73-90, 1992.
- CHONÉ, T. ; ANDREUX, F.; CORREA, J.C.; VOLKOFF, B. & CERRI, C.C. Changes in organic matter in a oxissol from the Central Amazonian forest during eighth years as pastures, determined by ¹³C isotopic composition. In: BERTHELIN, J.; ed diversity of enviromental biogeochemistry. Amsterdam, Elsevier, p. 397-405, 1991.
- CINTRA, F.L.D. Disponibilidade de água no solo para porta-enxertos de citros em ecossistemas de tabuleiro costeiro. Piracicaba: ESALQ, 1997. 90p. Tese de Doutorado.
- CLARK, R. B.; ALBERTS, E.E.; ZOBEL, R.W.; SINCLAIR, T. R.; MILLER, M. S.; KEMPER, WS. D.; FOY, C. D. Eastern gamagrass (*Tripsacum dactyloides*) root penetration into and chemical properties of claypan soils. *Plant and Soil*. V. 200, p. 33-45, 1998.
- CLARKSON, D.T. Adaptação morfológica e fisiológica das plantas e ambientes de baixa fertilidade. In: CABALA-ROSAND, P. (Ed). Reciclagem de nutrientes e agricultura de baixos insumos nos trópicos, p.45-75, 1985.
- COSTA, C.; DWYER, L. M.; HAMILTON, R. I.; HAMEL, C.; NANTAIS, L.; SMITH, D. L. A sampling method for measurement of large root systems with scanner-based image analysis. *Agronomy Journal*, 92: 621-627, 2000.
- CORSI, M.; MARTA JUNIOR, G. B.; PAGOTTO, D. S. Sistema radicular: Dinâmica e resposta a regimes de desfolha. In: A produção animal na Visão dos Brasileiros, p.838-852, 2000.
- DAVIDSON, L.R. Root systems – the forgotten component of pastures. In: WILSON, J.R. (Ed). *Plant relations in pastures*. Brisbane:CSIRO, 1978. p.86-94.
- DAWSON, L.A.; GRAYSTON, S.J.; MURRAY, P.J.; COOK, R.; GANGE, A.C.; ROSS, J.M.; PRATT, S.M.; DUFF, E.I. & TREONIS, A. Influence of pastures management (nitrogen and lime addition and insecticide treatment) on soil organisms and pastures root system dynamics in the field. *Plant and Soil*, V.255, p.121-130, 2003.
- De FARIA, V. P.; PEDREIRA, C.G.S.; SANTOS, F. A. P. Evolução do uso de pastagens para bovinos. In: Anais do 13º Simpósio sobre manejo da pastagem. Ed. ARISTEU MENDES PEIXOTO; JOSÉ CARLOS DE MOURA; VIDAL PEDROSO DE FARIA. p. 1-14, 1997.
- DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. *Soil Tillage Res.* v.11, p.199-238, 1988.
- DIAS CORREIA, A.A. Bioquímica nos solos, nas pastagens e forragens. Fundação Calouste Gulbenkian, 1986. 789p.

DOORMAR, J.F.; FOSTER, R.C. Nascent aggregates in the rhizosphere of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) *Can.J. Soil Sci.* v.71, p.465-474, 1971.

DOWDY, R.H., SMUCKER, A.J.M., DOLAN, M.S., FERGUSON, J.C. Automated image analysis for separating plant root debris elutriated from soil cores. *Plant and Soil* 200: 91-94, 1998.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro, 1999, 412p.

EVANS, P.S. Plant root distribution and water use patterns of some pasture and crop species. *New Zealand J. Agric. Res.*, v.21, p.261-265, 1978.

FAÇANHA, A. R.; FAÇANHA, A. L. O.; OLIVARES, F. L.; GURIDI, F.; SANTOS, G. A.; VELLOSO, A. C. X.; RUMJANEK, V. M. BRASIL, F.; SCHRIPSEMA, J.; BRAZ-FILHO, R.; OLIVEIRA, M. A. E CANELLAS, L. P. Bioatividade de ácidos húmicos: efeitos sobre o desenvolvimento radicular e sobre a bomba de prótons da membrana plasmática. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v. 37, n. 9, p. 1301-1310, set. 2002

FAGBENRO, J.A. AGBOOLA, A.A. Effect of different levels of humic acid on the growth and nutrient uptake of teak seedlings. *Journal of plant nutrition.* 1993. v. 16 (8) p. 1465-1483.

FAO. [www.http://faostat.fao.org](http://faostat.fao.org)

FAO, 1988: Soil Map of the World: Revised Legend, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 119 pp.

FARRELL, R. E.; WALLEY, F. L.; LUKEY, A. P.; GERMIDA, J. J. Manual and digital line-intercept methods of measuring root length- a comparison. *Agronomy Journal*, V: 85, 1233-1237, 1993.

FEIO, M. Clima e agricultura – Exigências climáticas das Principais culturas e potencialidades agrícolas do nosso clima. Ministério da Agricultura, Pesca e Alimentação, Lisboa, 1991. 266p.

FERGUSON, J.C. & SMUCKER, A.J.M. Modifications of the minirizotrófio video camera system for measuring spatial and temporal root dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 53, p.1601-1605, 1989.

FERNANDES, M. F.; TAVARES, E. D.; LEAL, M. L. da S.(Ed.). Workshop sobre sistema radicular: metodologia e estudos de casos. Embrapa Tabuleiros Costeiros. Aracaju, 1999. 300 p.

FISHER, M.J.; RAO, I.M.; AYARZA, M.A.; LASCANO, C.E.; SANZ, J.I.; THOMAS, R.J. & VERA, R.R. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature* 371:236-238, 1994.

Fisher, N.M., Dunham, R.J. Root morphology and nutrient uptake. In: *The physiology of tropical fiends crops.* (P.R. Goldsworthy & N.M. Fisher, ed) John Wiley & sons, New York. P. 85-117. 1984.

FITTER, A. H. Characteristics and functions of root systems. In: EASEL, Y.; ESHEL, A., (Eds) *Plant roots: the hidden half.* New York, Marcel dekker, p. 3-25, 1991.

FITTER, A. H., SELF, G.K., WOLFENDEN, J. VAN VUUREN, M.M.I.; BROWN, T. K., WILLIAMSON, L.; GRAVES, J.D.; ROBINSON, D. Root production and mortality under elevated atmospheric carbon dioxide. *Plant and soil.* V.187, p.299-306, 1996.

- FLORIS, J.; Van NOORDWIJK, M. Improved methods for the extraction of soil samples for root research. *Plant and Soil*, 77: 369-372, 1984.
- FRANÇA, M.G.C.; ROSSIELLO, R.O.P.; ZONTA, E.; ARAUJO, A.P.; RAMOS, F.T. Desenvolvimento radicular e influxo de nitrogênio em duas cultivares de arroz. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.34, n.10, p.1845-1853, 1999.
- GERWITZ, A; PAGE, E. An empirical mathematical model to describe plant root systems. *Journal of Applied Ecology*, Oxford, v.11, p. 773-781, 1974.
- GOEDERT, W.J.; RITCHEY, K.D. & SANZONOWICZ, C. Desenvolvimento radicular do capim *Andropogon* e sua relação com o teor de cálcio no perfil de solo. *R.bras.Ci.Solo*, 9:89-9, 1985.
- GOSS, M.J.; BARRACLOUGH, P.B.; POWELL, B.A. the extend to wich physical factors in the rooting zone limit crop groth. *Aspects Appl Biol*. V.22: p.173-182, 1989.
- GUENNI, O.; MARÍN, D. & BARUCH, Z. Responses to drought of five *Brachiaria* species. I. Biomass production, leaf growth, root distribution, water use and forage quality. *Plant and Soil*, V.243: p. 229-241, 2002.
- hanks, r.j. & ashcroft, l.a. physical properties of soil. Utah, Departament of Soil Science and Biometeorology – Utah University, 1976. 127 p.
- HAYNES, R.J.; BEARE, M.H. Aggregation and organic matter storage in meso-thermal humid soils. In: CARTER, M.R.; STUART, B.A., Ed. *Structure and organic matter storage in agricultural soils*. Boca raton: Lewis Publishers, 1996. P.213-262.
- HENDRICK, R. L.; PREGITZER, K.S. Patterns of fine root mortality in two sugar maple forests. *Nature*. V.361, p.59-61, 1993.
- HIGGINS, P.T.; JACKSON, R.R.; DES ROSIERS, J.M.; FIELD, C.B. Root production and demography in a California annual grassland under elevated atmospheric carbon dioxide. *Global Change Biology*, V.8, p.841-850, 2002.
- HOOKER, J.E.; HENDRICK, R. ATKINSON, D. The measurement and analysis of fine root longevity. In: SMIT, A.L.; BENGOUGH, A.G.; ENGELS, C.; VAN NOORDWIJK, M.; PELLERIN, S.; VAN DE GEIJN, S.C. (Eds) *Root methods: a handbook*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2000, p.273-304, 2000.
- HOWELER, R. H.; SIEVERDING, E. SAIF, S. practical aspect of mycorrhizal technology in some tropical crops and pastures. *Plant and Soil*. V.100, p. 249-283, 1987.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA E GEOFÍSICA. Normais climatológicas da região de “ Alentejo Algarve”, correspondentes a 1951-1980. Fasciculo XLIX, V.4, Lisboa 1991. 98p.
- JACKSON, R.B.; CALDWELL, M.M. Geostatistical patterns of soil heterogeneity around individual perennial plants. *J. Ecol*, v.81, p.683-692, 1993.
- JOHNSON, M.G.; TINGEY, D.T.; PHILLIPS, D.L. & STORNS, M.J. Advancing fine root research with minirhizotrons. *Environmental and Experimental botany*, v. 45, p.263-289, 2001.
- JORGE, L.A.C. Recomendações práticas para aquisição de imagens digitais analisadas através do SIARCS. Circular Técnica N°1, Embrapa Instrumentação Agropecuária. Dezembro, 1996. 44p.

- JORGE, L.A.C.; CRESTANA, S. SIARCS 3.0: novo aplicativo para análise de imagens digitais aplicado a ciência do solo. In: Congresso Latino Americano de Ciência do solo, 13. águas de Lindóia-SP. Solo suelo. Campinas: SBCS 1996. 5p. CD-ROM
- KEMPH, G.S. Measuring fibrous roots with leaf area meter. *J. Range Management*, 29: 85-86, 1976.
- KIEHL, E.J. manual de edafologia – relações solo-planta. Editora Agronômica Ceres, São Paulo, SP, p. 246-261, 1979.
- Kochian, L.V. Cellular mechanism of aluminum toxicity and resistance in plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 46: 237-260, 1995.
- Kolesnikov, V. The root system of fruit plants. Mir Publishers, Moscow. 1971.269 p.
- KÖPKE, U. Methods for studying root growth. In RUSSEL, R.S.; IGUE, K.; MEHTA, Y.R.J. The soil/root system in relation to Brazilian agriculture. Londrina: Iapar, p. 303-318, 1981.
- LASCANO, C.E. Managing the grazing resource for animal production in savannas of tropical America. *Tropical Grassland*, v. 25, p. 66-72, 1991.
- LAVELLE, P.; BLANCHART, E.; MARTIN, A. Impact of soil fauna on the properties of soils in the humid tropics. *SSSA Special Publ.*, 29:157-185, USA, 1992.
- LAVRES JUNIOR, J.; MONTEIRO, F. A. Perfilamento, área foliar e sistema radicular do capim Mombaça submetido a combinações de doses de nitrogênio e potássio. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v.32, n.5, p.1068-1075, 2003.
- LEBOWITZ, R.J. Digital analysis measurement of root length and diameter. *Environmental and Experimental Botany*, Elmsford, v.28, n.3, p.267-273, 1988.
- LIBARDI, P. L.; VAN LIER, Q. de J. Atuação dos fatores físicos do solo no desenvolvimento do sistema radicular. In: Anais Workshop sobre sistema radicular: Metodologias e Estudo de Casos. M.F. FERNANDES; E.D. TAVARES; M. L. da S. LEAL (Ed.). Embrapa Tabuleiros Costeiros. Aracaju, 1999. p.47-56
- MA, J.F; RYAN, P.R; DELHAIZE, E. Aluminium Tolerance in plants and the complexing role of organic acids. *TRENDS in Plant Science*. v. 6, n.6, p.1360 – 1385, 2001.
- MACEDO, M.C.M. Pastagens no ecossistema dos Cerrados: Pesquisas para o desenvolvimento sustentável. In: Simpósio sobre Pastagens nos ecossistemas brasileiros. XXXII Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia. 1995.
- MACHADO, R.M.A.; OLIVEIRA, M.R.G. 2003. Comparison of tomato root distributions by minirhizotron and destructive sampling. "Plant and Soil" :255, p. 375-385.
- MAJDI, H, SMUCKER, A.J.M.; PERSSON, H. A comparison between minirhizotron and monolith sampling methods for measuring root growth of maize (*Zea mays* L.). *Plant and Soil*, v.147, p. 127-134, 1992.
- MANLEY J.T., SCHUMAN J.D., REEDER J.D., & HART R.H. 1995. Rangeland soil carbon and nitrogen responses to grazing. *Journal of Soil and Water Conservation* 50(3):294-298.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. @ ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.

- MARTORANO, L. G.; MATOS, R.M.B.; SILVA, E. M. R.; ANGELOCCI, L. R.; PEREIRA, F. ^a; VILLA NOVA, N. ^a Disponibilidade climática para cultivo da bananeira na região de seropédica/Itaguaí-RJ. In: Anais do X Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Piracicaba: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, p. 301-303, 1997.
- MATERECHERA, S.A.; DEXTER, A.R.; ALTSON, A.M. Penetration of very strong soils by seedlings roots of different plant species. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 135, p.31-41, 1991.
- MATTA, F. M. Mecanismos fisiológicos associados ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas. In: Anais Workshop sobre sistema radicular: Metodologias e Estudo de Casos. M.F. FERNANDES; E.D. TAVARES; M. L. da S. LEAL (Ed.). Embrapa Tabuleiros Costeiros. Aracaju, p.13-17, 1999.
- MC BRATNEY, A.B., WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *Journal of Soil Science*, 37, 617-639, 1986.
- McCULLY, M. E. Roots in soil: unearthing the complexities of roots and their rhizospheres. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. V.50:695-718, 1999.
- MELO, B. O azevém, uma forragem de grande importância. *Ao serviço da Lavoura* n0185, Abril a setembro, p.17-19, 1985.
- MIELNICZUCK, J. Importância do estudo de raízes no desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis. In: Anais Workshop sobre sistema radicular: Metodologias e Estudo de Casos. M.F. FERNANDES; E.D. TAVARES; M. L. da S. LEAL (Ed.). Embrapa Tabuleiros Costeiros. Aracaju p.13-17, 1999.
- MSTAT-C. A microcomputer program for the design, management, and analysis of agronomic research experiments. Michigan: MSTAT Distribution Package, 1991.
- NEPSTAD, D.C.; UHL, C.; SERRAO, E. A. S. Recuperation of a degraded Amazonian landscape: forest recovery and agriculture restoration. *Ambio*. V. 20, p.248-255, 1991.
- NETER, J.; WASSERMAN, W.; KUTNER, M.H. *Applied linear statistical models*. 3ed. Burr Ridge: Richard D. Irwin, 1990. 1181p.
- NEWMAN, E. I. A method of estimating the total root length in a sample. *J. Applied Ecology*, 3: 139-145, 1966.
- Nichol B.E., Oliveira L.A., Effects of aluminium on the growth and distribution of calcium in roots of an aluminium-sensitive cultivar of barley (*Hordeum vulgare*), *Can. J. Bot.* 73:1849-1858. 1995.
- NICOULLAUD, B.; KING, D.; TARDIEU, F. Vertical distribution of maize roots in relation to permanent soil characteristics. *Plant and Soil*, 159: 245-254, 1994.
- OADES, J.M. Mucilages at the root surface. *J. Soil Sci.*, London, 29:1-16, 1978.
- OLIVEIRA, M.R.G. Comportamento do sistema radical de algumas espécies forrageiras e prateiras com interesse para a modernização dos sistemas de agricultura no Alentejo. Tese de Doutorado, Universidade de Évora, Évora, Portugal, 1988.311p.

OLIVEIRA, M.R.G.; VAN NOORDWIJK, M.; GAZE, S.R.; BROUWER, G.; BONA, S.; MOSCA, G. HAIRIAH, K. Auger sampling, ingrowth cores and pinboard methods. In: SMIT, A.L.; BENGOUGH, A.G.; ENGELS, C.; VAN NOORDWIJK, M.; PELLERIN, S.; VAN DE GEIJN, S.C. (Eds) Root methods: a handbook. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, p.176-206, 2000.

OLIVEIRA, J.B. Pedologia aplicada. Jaboticabal – SP, FUNEP, 2001. 414 p.

OLIVEIRA, O. C. Parâmetros químicos e biológicos relacionados com a degradação de pastagens de *Brachiaria* spp. no cerrado brasileiro. Tese de doutorado. UFRRJ, Seropédica, 2000. 243p.

PACIORNIK, S.; SCURI, A. Processamento de imagens: Aplicações científicas e industriais. 2ª Edição. Deptº Ciência dos materiais e metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Cordenção Central de Extensão, 2000.

PINHEIRO, E.F.M.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C. Aggregate distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in a red latosol from Brazil. *Soil Tillage Research*, v.77, p.79-84, 2004.

PINTON, R. CESCO, S. SANTI, S. VARANINI, Z. Soil humic substances stimulate proton release by intact oat seedling roots. *Journal of plant nutrition*, v. 20 (7/8), p. 857-869, 1997.

PINTON, R. CESCO, S.SANTI, S. VARANINI, Z. Effect of soil humic substances on surface redox activity of oat roots. *Journal of plant nutrition*, v. 18 (10) p. 2111-2120, 1995.

PLANT, R. E. Site specific management: the application of information technology to crop production. *Computers and electronics in agriculture*. Elseviers Science B.V., Volume 30, 9-29 pp. 2001.

PRICE, J.S. & HENDRICK, R.L. Fine root length production, mortality and standing root crop dynamics in an intensively managed sweetgum (*Liquidambar styraciflua* L.) coppice. *Plant and soil* v.205, p.193-201, 1998.

QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; PADRO, H.; MORETTI, F.C. Aspectos estruturais de raízes de cana de açúcar sob efeito da compactação do solo. *Bragantia*, Campinas, 57 (1):49-55, 1998

RAMOS, D.P.; CASTRO, A.F.; CAMARGO, M.N. Levantamento detalhado de solos da área da Universidade Federal do Rio de Janeiro. *Pesquisa agropecuária brasileira, Série Agronomia*, 8: 1-27, 1973.

RAO, I. M.; KERRIDGE, P.C.; MACEDO, M. C.M. Nutrition requirements of *Brachiaria* and adaptation to acid soils. In: MILES, J.W.; MAASS, B.L.; VALLE, C.B. *Brachiaria: Biology, agronomy, and improvement*. CIAT, Cali, Colombia. p. 53-71, 1996.

REICHARDT, K. Soil physico-chemical conditions and the development of roots. In RUSSEL, R.S.; IGUE, K.; MEHTA, Y.R.J. *The soil/root system in relation to Brazilian agriculture*. Londrina: Iapar, 1981. p.103-114.

REZENDE, J.O. Solos coesos dos tabuleiros costeiros: Limitações agrícolas e manejo. *Série estudos agrícolas*, 1, Salvador, 2000. 117p.

- RITCHNER, W.; LIEDGENS, M.; BÜRGI, H.; SOLDATI, A.; STAMP, P. Root image analysis and interpretation. In: SMIT, A.L.; BENGOUGH, A.G.; ENGELS, C.; VAN NOORDWIJK, M.; PELLERIN, S.; VAN DE GEIJN, S.C. (Eds) Root methods: a handbook. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, p.305-341, 2000.
- ROBERTS, M.J., LONG, S.P., TIEZEN, LL., BEADLE, C.L. Measurement of plant biomass and net primary production of herbaceous vegetation. In: D.O.Hall, J.M. O. Surlock, H.R. Bolhàr-Nordenkamp, R.C. Leegood, S.P. Long.(Ed.) Photosynthesis and production in a changing environment: a field and laboratory manual. Chapman & Hall, London. p. 1-21, 1993.
- ROCHA FILHO, J.; JORGE, L.A.C.; PRIMAVESI, O. & CRESTANA, S. Distribuição radicular de forrageiras, afetada pela intensidade de manejo, avaliada por análise de imagens digitais. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13, Águas de Lindóia. Resumos expandidos, ESALQ/SBCS, 1996.
- RODRIGUES, A.C.G; CADIMA-ZEVALLOS, A. Efeito da intensidade de pastejo sobre o sistema radicular de pastagem. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.26, p.439-445, 1991.
- ROSSIELLO, R. O. P.; ARAÚJO, A. P.; MANZATTO, C. V.; FERNANDES, M. S. Comparação dos métodos fotoelétrico e da interseção na determinação de área, comprimento e raio médio radicular. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 30 (5): 633 - 638, 1995.
- SCHUURMAM, J.J.; GOEDEWAAGEN, M.A.J. Methods for the examination of root systems and roots, 2 nd. Edn. Centre for Agricultural publishing and documentation, Wageningen, The Netherlands. 1991.
- SCURLOCK, J.M.O.; HALL, D.O. The global carbon sink: a grassland perspective. Global Change Biology, 4: 229- 233, 1998.
- SHANNON, C.E. "Communication in the presence of noise," Proc. Institute of Radio Engineers, vol. 37, no.1, pp. 10-21, Jan. 1949.
- SILVA, I.F. da; MIELNICZUCK, J. Ação do sistema radicular de Plantas na formação e estabilização de agregados do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.21, p.113-117, 1997.
- Sivaguru M, Fujiwara T, Samaj J, Baluska F, Yang Z, Osawa H Aluminum-induced 1,3-b -D-glucan inhibits cell-to-cell trafficking of molecules through plasmodesmata. A new mechanism of aluminum toxicity in plants. Plant Physiol. 124: 991-1005. 2000.
- Sivaguru, M; Horst, W.J. The distal part of the transition zone is the most aluminum-sensitive apical root zone of maize. Plant Physiol. 116: 155-163. 1998.
- SMIT, A.L.; BENGOUGH, A.G.; ENGELS, C.; VAN NOORDWIJK, M.; PELLERIN, S.; VAN DE GEIJN, S.C. (Eds) Root methods: a handbook. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2000. 587 p.
- SMUCKER, A. J. M.; FERGUSON, J. C.; DeBRRUYN, W. P.; BELFORD, R. K.; RITCHIE, J. T. Image analysis of video-recorded plant root systems. In: TAYLOR, H. M.(Ed) Minirhizotron observation tubes: methods and applications for measuring rhizosphere dynamics. ASA Spec Publ. V:50, p. 67-80, 1987.

STAFANATO, J.B.; VIANA, A.A.; ETCHEVERRIA, F.H.; CORREIA, F.S.; PIMENTA, L.M.M.; CONSTANTINI, A.; BRASIL, F.C.; ROSSIELLO, R.P.O.R. Comparação de métodos de amostragem para quantificação da massa seca de raízes de uma pastagem de *Brachiaria humidicola*. Anais da XXV Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas-Fertbio2002, 8 a 13 de setembro, Rio de Janeiro, p.156.2002.

STEEN, E. Variation of root growth in a grass ley studied with a mesh bag technique. Swedish, J. Agric. Res. V.14, p.93-97, 1984.

TAYLOR, H.M. Managing root systems to reduce plant water deficits. In RUSSEL, R.S.; IGUE, K.; MEHTA, Y.R.J. The soil/root system in relation to Brazilian agriculture. Londrina: Iapar, 1981. p.45-60.

TENNANT, D. (1975). A teste of a modified line intersect method of estimating root length. J.Ecol. V.63:995-1001.

TIMÓTEO, T.J.F. Estudo da influencia do povoamento no potencial produtivo e valor nutritivo de quatro genótipos de Azevém Anual. Trabalho de Fim de curso, Curso de Engenharia Agrícola, Universidade de Évora, 1999. 88p.

TISDALL, J.M. Formation of soil aggregates and accumulation of soil organic matter. In: CARTER, R.M.; STEWART, B.A. (Eds.) Structure and organic matter storage in agricultural soils. Lewis Publishers, Boca Raton, p.57-95, 1996.

TREMMEL, D.C. Roottracker 2.0© -Software for root image analysis, Duke University, 2003.

URQUIAGA, S.; CADISH, G.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M.; GILLER, K. E. Influence of decomposition of roots of tropical forage species on the availability of soil nitrogen. Soil Biology & Biochemistry.V:30, p. 2099-2106, 1998.

VAN NORDWIJK, M.; FLORIS, J. and de JAGER, A. Sampling schemes for estimating root density distribution in cropped fields. Neth J Agric Sci, V.33: P.241-262, 1985.

VAN NOORDWIJK, M. Methods for quantification of root distribution pattern and root dynamics in the field. 20 th, Colloquium International Potash Institute, Bern, Switerland, p.263-281, 1987.

VAN NOORDWIJK, M. Roots: length, biomass, production and mortality. In: ANDERSON, J. M. AND INGRAM, J. S. I.1993. Tropical Soil Biology and Fertility: a Handbook of methods. CAB International, Wallingford. p. 132-144, 1993.

VAN NOORDWIJK, M. VAN DE GEIN, S. C. 1996. Root shoot and soil parameters required for process orientated models of crop growth limited by water or nutrients. Plant and Soil. p. 1-25, 1985.

VAN NOORDWIJK, M. VAN DE GEIN, S. C. Root shoot and soil parameters required for process orientated models of crop growth limited by water or nutrients. Plant and Soil. V. 185, p. 1-25, 1996.

VAN NOORDWIJK, M.; BROUWER, G.; MEIJBOOM, F.; OLIVEIRA, M.R.G; BENGOUGH, A.G. Trench profile techniques and core break methods. In: SMIT, A.L.; BENGOUGH, A.G.; ENGELS, C.; VAN NOORDWIJK, M.; PELLERIN, S.; VAN DE GEIJN, S.C. (Eds) Root methods: a handbook. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, p. 211-234, 2000.

- VAN VEEN, J.A.; MERCKX, R. & VAN de GEIJN, S.C. Plant-and-soil-related controls of flow of carbon from roots through the soil microbial biomass. *Plant and Soil*, 115:179-188, 1989.
- VIEIRA, S.R.; LOMBARDI NETO, F. & BURROWS, I.T. Mapeamento da chuva máxima provável para o Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Campinas, 15:93-98, 1991.
- VIEIRA, S.R. Uso de geoestatística em estudos de variabilidade espacial de propriedades do solo. In: *Tópicos em Ciência do Solo*, R. F. Novais (ed.), Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, p. 1-54, 2000.
- VIEIRA, S.R.; MILLETE, J.A.; TOPP, G.C. & REYNOLDS, W.D. Handbook for Geostatistical analysis of variability in soil and meteorological parameters. In: *Tópicos em Ciência do Solo vol. 2*, Alvarez V., V. H (eds). Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, p. 1-45, 2002.
- VOGT, K. A.; VOGT, D. J. and JANINE BLOOMFIELD. Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and production of forest at ecosystem level. *Plant and Soil*. V: 200, p. 71-89, 1998.
- WEBSTER, R. Statistics to support soil research and their presentation. *European Journal of Soil Science*, v.52, p.331-340, 2001.
- WHALLEY, W.R.; LIPIEC, J.; STEPNIIEWSKI, W.; TARDIEU, F. Control and measurement of physical environment in root growth experiments. In: SMIT, A.L.; BENGOUGH, A.G.; ENGELS, C.; VAN NOORDWIJK, M.; PELLERIN, S.; VAN DE GEIJN, S.C. (Eds) *Root methods: a handbook*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, p.76-106, 2000.
- WOOMER, P.L.; MARTIN, A.; ALBRECHT, A; RESCK, D.V.S.; SCHARPENSEEL, H.W. The importance and management of soil organic matter in the tropics. In: *The Biological Management of tropical Soil Fertility*. Woomer, P.L. & Swift, M.J., eds. Chichester: John Wiley & Sons, 3, p. 47-80, 1994.

9. ANEXOS

ANEXO I – Médias da densidade da área radicular cm^2 de raízes dm^{-3} , referente ao Capítulo I.

Tabela anexo 1. Efeito da queima e da roçada na densidade da área radicular total (cm^2 de raízes dm^{-3} de solo) de uma pastagem de *Brachiaria humidicola*, em função da época de amostragem e à profundidade de 0-0,1 m. (valores médios de 4 repetições).

Época	Área (cm^2 de raízes dm^{-3} de solo) na profundidade 0 – 0,1 m		
	testemunha	queimada	roçada
	Raízes Grossas		
Fevereiro	22 a	29 a	39 a
Abril	47 a	48 a	25 a
Junho	124 a	29 a	30 a
Agosto	17 a	29 a	29 a
Média	52 A	34 A	31 A
	Raízes médias		
Fevereiro	77 a	88 a	113 a
Abril	108 a	111 a	96 a
Junho	93 a	48 a	122 a
Agosto	56 a	56 a	115 a
Média	84 A	76 A	111 A
	Raízes finas		
Fevereiro	83 a	88 a	168 a
Abril	134 a	123 a	138 a
Junho	152 a	85 a	135 a
Agosto	95 a	66 a	185 a
Média	116 AB	90 B	156 A
	Raízes muito finas		
Fevereiro	1176 a	787 ab	901 b
Abril	788 b	861 ab	1367 a
Junho	751 b	1087 a	1128 ab
Agosto	295 c	597 b	826 b
Média	752 A	833 A	1055 A
	Total de todas as classes		
Fevereiro	1358 a	991 ab	1220ab
Abril	1077 a	1143 ab	1625a
Junho	1120 a	1249 a	1415 ab
Agosto	463 b	748 b	1155b
Média	1004 A	1033 A	1354 A

Valores seguidos de letras iguais, minúsculas dentro de época e maiúsculas dentro de tratamento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela anexo 2. Efeito da queima e da roçada na densidade da área radicular total (cm² de raízes dm⁻³ de solo) de uma pastagem de *Brachiaria humidicola*, em função da época de amostragem e à profundidade de 01-0,2 m. (valores médios de 4 repetições).

Época	Área (cm ² de raízes dm ⁻³ de solo) na profundidade 0,1-0,2 m		
	testemunha	queimada	roçada
	Raízes Grossas		
Fevereiro	19 a	14 a	28 a
Abril	16 a	23 a	15 a
Junho	20 a	18 a	20 a
Agosto	13 a	13 a	10 a
Média	17 A	17 A	18 A
	Raízes médias		
Fevereiro	52 a	52 a	58 a
Abril	35 a	44 a	41 a
Junho	56 a	29 a	55 a
Agosto	35 a	16 a	56 a
Média	45 A	35 A	52 A
	Raízes finas		
Fevereiro	58 a	44 a	93 a
Abril	54 a	48 a	53 a
Junho	68 a	54 a	75 a
Agosto	53 a	29 a	106 a
Média	58 AB	43 B	82 A
	Raízes muito finas		
Fevereiro	414 a	476 a	599 a
Abril	321 a	514 a	500 a
Junho	285 a	537 a	471 a
Agosto	177 a	396 a	394 a
Média	299 B	481 A	491 A
	Total de todas as classes		
Fevereiro	542 a	586 a	778 a
Abril	426 a	629 a	609 a
Junho	429 a	634 a	621 a
Agosto	277 a	454 a	565 a
Média	419 B	576 AB	644 A

Valores seguidos de letras iguais, minúsculas dentro de época e maiúsculas dentro de tratamento, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05).

Tabela anexo 3. Efeito da queima e da roçada na densidade da área radicular total (cm² de raízes dm⁻³ de solo) de uma pastagem de *Brachiaria humidicola*, em função da época de amostragem e à profundidade de 0,2-0,3 m. (valores médios de 4 repetições).

Época	Área (cm ² de raízes dm ⁻³ de solo) na profundidade 0,2-0,3 m		
	testemunha	queimada	roçada
	Raízes Grossas		
Fevereiro	12,6 a	3,1 a	17,4 a
Abril	14,0 a	7,8 a	14,0 a
Junho	3,6 a	8,6 a	12,4 a
Agosto	8,8 a	6,8 a	10,5 a
Média	9,78 A	6,58 A	13,57 A
	Raízes médias		
Fevereiro	20,8 a	12,7 a	41,6 a
Abril	16,7 a	24,6 ^a	19,9 a
Junho	20,1 a	14,8 a	21,4 a
Agosto	19,4 a	5,4 a	22,2 a
Média	19,2 A	14,4 A	26,3 A
	Raízes finas		
Fevereiro	33,2 a	27,2 a	43,1 ab
Abril	27,1 a	41,6 a	27,0 b
Junho	22,8 a	23,5 a	33,2 b
Agosto	21,0 a	23,1 a	69,4 a
Média	26 A	28,9 A	43,2 A
	Raízes muito finas		
Fevereiro	135 a	217ab	252 a
Abril	150 a	343 a	190 ab
Junho	127 a	297ab	202 ab
Agosto	84 a	210 b	122 b
Média	124 B	267A	191AB
	Total de todas as classes		
Fevereiro	201 a	260 b	354 a
Abril	208 a	417 a	251 a
Junho	173 a	344 ab	269 a
Agosto	134 a	245 b	224 a
Média	179B	316A	274AB

Valores seguidos de letras iguais, minúsculas dentro de época e maiúsculas dentro de tratamento, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

Tabela anexo 4. Efeito da queima e da roçada na densidade da área radicular total (cm² de raízes dm⁻³ de solo) de uma pastagem de *Brachiaria humidicola*, em função da época de amostragem e à profundidade de 0,3-0,4 m. (valores médios de 4 repetições).

Época	Área (cm ² de raízes dm ⁻³ de solo) na profundidade 0,3-0,4 m		
	testemunha	queimada	roçada
	Raízes Grossas		
Fevereiro	7,9 a	0,0 a	4,0 ab
Abril	5,5 ab	0,0 a	9,0 a
Junho	2,9ab	0,69 a	3,0 b
Agosto	1,8 b	0,84 a	3,1 b
Média	4,5A	0,38A	4,8A
	Raízes médias		
Fevereiro	14,0 a	6,5 a	12,8 a
Abril	11,2 a	14,8 a	12,6 a
Junho	10,2 a	8,7 a	16,4 a
Agosto	5,3 a	3,9 a	17,8 a
Média	10,2 A	8,5 A	14,9 A
	Raízes finas		
Fevereiro	13,8 a	22,5 a	26,2 a
Abril	26,0 a	19,1 a	20,4 a
Junho	16,0 a	23,8 a	18,2 a
Agosto	22,6 a	20 a	31,9 a
Média	19,6 A	21,3 A	24,2 A
	Raízes muito finas		
Fevereiro	118 a	137 a	92 a
Abril	122 a	156 a	93 a
Junho	89 a	202 a	81 a
Agosto	50 a	180 a	99 a
Média	95 B	169 A	91 B
	Total de todas as classes		
Fevereiro	154 a	166 a	135 a
Abril	165 a	190 ^a	135 a
Junho	118 a	235 a	118 a
Agosto	80 a	205 a	157 a
Média	129 B	199 A	135 B

Valores seguidos de letras iguais, minúsculas dentro de época e maiúsculas dentro de tratamento, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

Tabela anexo 5. Efeito da queima e da roçada na densidade da área radicular total (cm² de raízes dm⁻³ de solo) de uma pastagem de *Brachiaria humidicola*, em função da época de amostragem e à profundidade de 0,4-0,5 m. (valores médios de 4 repetições).

Época	Área (cm ² de raízes dm ⁻³ de solo) na profundidade 0,4-0,5 m		
	testemunha	Queimada	roçada
	Raízes Grossas		
Fevereiro	3,4 a	1,2 a	2,9 a
Abril	2,2 a	1,9 a	0,5 a
Junho	0,0 a	0,5 a	1,4 a
Agosto	0,0 a	1,0 a	0,0 a
Média	1,4 A	1,1 A	1,2 A
	Raízes médias		
Fevereiro	8,4 a	1,1 b	9,8 a
Abril	12,1 a	14,6 a	3,3 a
Junho	9,1 a	8,1 ab	4,9 a
Agosto	3,3 a	0,5 b	6,9 a
Média	8,2 A	6,1 A	6,2 A
	Raízes finas		
Fevereiro	14,3 a	14,6 a	18,6 a
Abril	20,4 a	21,3 a	10,7 a
Junho	20,3 a	20,7 a	13,8 a
Agosto	11,6 a	17,7 a	12,9 a
Média	16,6 A	18,6 A	14 A
	Raízes muito finas		
Fevereiro	77,2 a	87,9 a	58,3 a
Abril	65,8 a	129 a	48,5 a
Junho	58,5 a	135 a	37,4 a
Agosto	30,8 a	108 a	28,2 a
Média	58,1B	115A	43,1B
	Total de todas as classes		
Fevereiro	103 a	105 a	90 a
Abril	101 a	167 a	63 a
Junho	88 a	164 a	58 a
Agosto	46 a	127 a	48 a
Média	84B	141A	65B

Valores seguidos de letras iguais, minúsculas dentro de época e maiúsculas dentro de tratamento, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

Tabela anexo 6. Efeito da queima e da roçada na densidade da área radicular total (cm^2 de raízes dm^{-3} de solo) de uma pastagem de *Brachiaria humidicola*, em função da época de amostragem e à profundidade de 0,5-0,6 m. (valores médios de 4 repetições).

Época	Área (cm^2 de raízes dm^{-3} de solo) na profundidade 0,5-0,6 m		
	testemunha	queimada	roçada
Raízes Grossas			
Fevereiro	1,16 a	1,32 a	1,64 a
Abril	1,18 a	0,00 a	0,36 a
Junho	0,00 a	0,00 a	0,70 a
Agosto	0,00 a	0,88 a	0,00 a
Média	0,59 A	0,55 A	0,67 A
Raízes médias			
Fevereiro	3,14 a	1,09 b	6,38 a
Abril	7,32 a	10,34 a	2,65 a
Junho	4,65 a	3,10 b	3,66 a
Agosto	1,02 a	1,29 b	2,42 a
Média	4,03 A	3,95 A	3,77 A
Raízes finas			
Fevereiro	5,3 a	7,7 a	20,6 a
Abril	9,2 a	18,8 a	8,3 a
Junho	11,7 a	14 a	11,9 a
Agosto	7,6 a	17,4 a	12,10 a
Média	8,5 A	14,5 A	13,2 A
Raízes muito finas			
Fevereiro	49 a	53 a	44 a
Abril	35 a	79 a	27 a
Junho	33 a	59 a	27 a
Agosto	21 a	65 a	23 a
Média	34 B	64 A	30B
Total de todas as classes			
Fevereiro	58 a	64 a	73 a
Abril	53 a	109 a	38 a
Junho	49 a	76 a	43 a
Agosto	30 a	85 a	37 a
Média	47 B	83 A	48 B

Valores seguidos de letras iguais, minúsculas dentro de época e maiúsculas dentro de tratamento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela anexo 7. Efeito da queima e da roçada na densidade da área radicular total (cm^2 de raízes dm^{-3} de solo) de uma pastagem de *Brachiaria humidicola*, em função da época de amostragem e à profundidade de 0,6-0,7 m. (valores médios de 4 repetições).

Época	Área (cm^2 de raízes dm^{-3} de solo) na profundidade 0,6 – 0,7 m		
	testemunha	queimada	roçada
	Raízes Grossas		
Fevereiro	1,23 a	0,48 a	2,13 a
Abril	1,20 a	0,00 a	0,00 a
Junho	0,44 a	0,00 a	0,50 a
Agosto	0,00 a	0,29 a	0,79 a
Média	0,72 A	0,19 A	0,85 A
	Raízes médias		
Fevereiro	4,68 a	0,32 b	7,24 a
Abril	4,51 a	7,47 a	0,24 b
Junho	2,73 a	5,81 ab	3,32 ab
Agosto	0,00 a	1,50 ab	1,32 ab
Média	2,98 A	3,78 A	3,03 A
	Raízes finas		
Fevereiro	4,3 a	4,9 a	9,5 a
Abril	7,4 a	14,6 a	5,4 a
Junho	9,7 a	7,8 a	5,6 a
Agosto	4,4 a	8,6 a	10,3 a
Média	6,4 A	9,0 A	7,7 A
	Raízes muito finas		
Fevereiro	27 a	35ab	38 a
Abril	25 a	50 a	23ab
Junho	15 a	30 b	14 b
Agosto	19 a	36ab	19 b
Média	22 A	38 A	23 A
	Total de todas as classes		
Fevereiro	38 a	41 b	57 a
Abril	38 a	72 a	28 b
Junho	28 a	43 b	23 b
Agosto	23 a	46 ab	31ab
Média	32 A	50 A	35 A

Valores seguidos de letras iguais, minúsculas dentro de época e maiúsculas dentro de tratamento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

ANEXO II - CROQUI DA ÁREA EXPERIMENTAL - Capítulo II

X -----50 metros-----

		Amostras a cada 5 metros									
Linha 1		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10 metros											
Linha 2		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Linha 3		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Linha 4		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Linha 5		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Linha 6		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Linha 7		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Linha 8		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Linha 9		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Linha 10		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

100m
Y

* Para cada data de coleta foi feito um deslocamento de 1 metro a partir do ponto da coleta anterior.

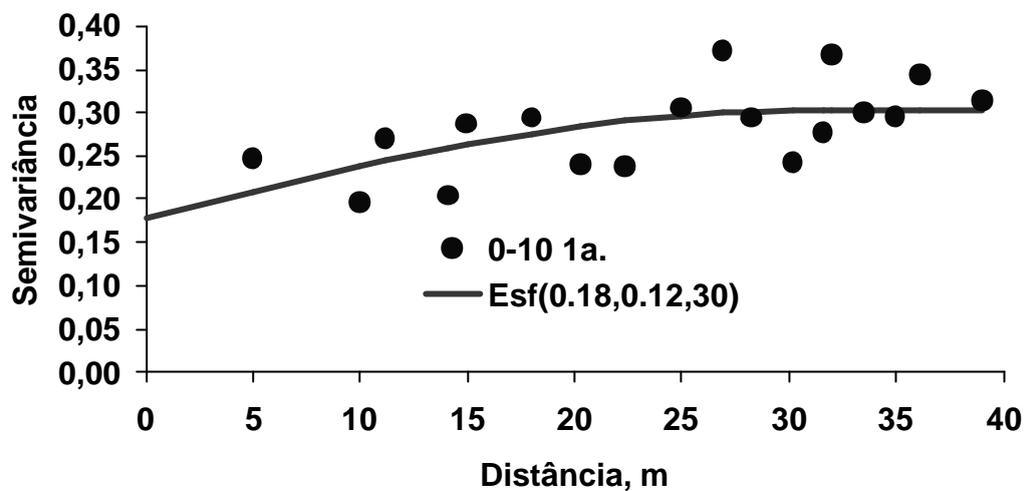


Figura Anexo 2. Semivariograma dos valores da DMSR da profundidade 0-0,1 m na 1ª época de amostragem.

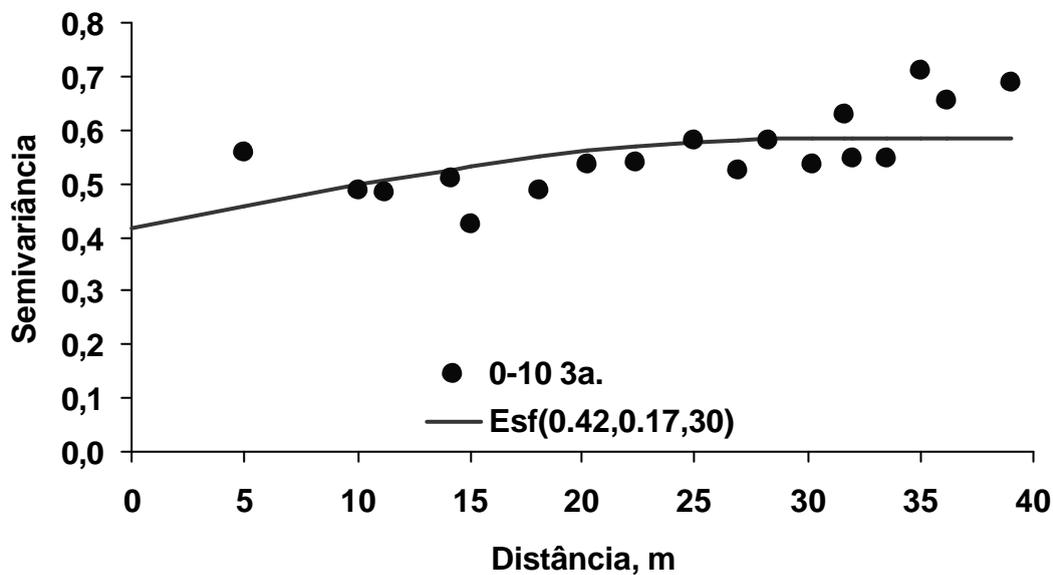


Figura anexo 3. Semivariograma dos valores da DMSR da profundidade 0-0,1 m na 3ª época de amostragem.

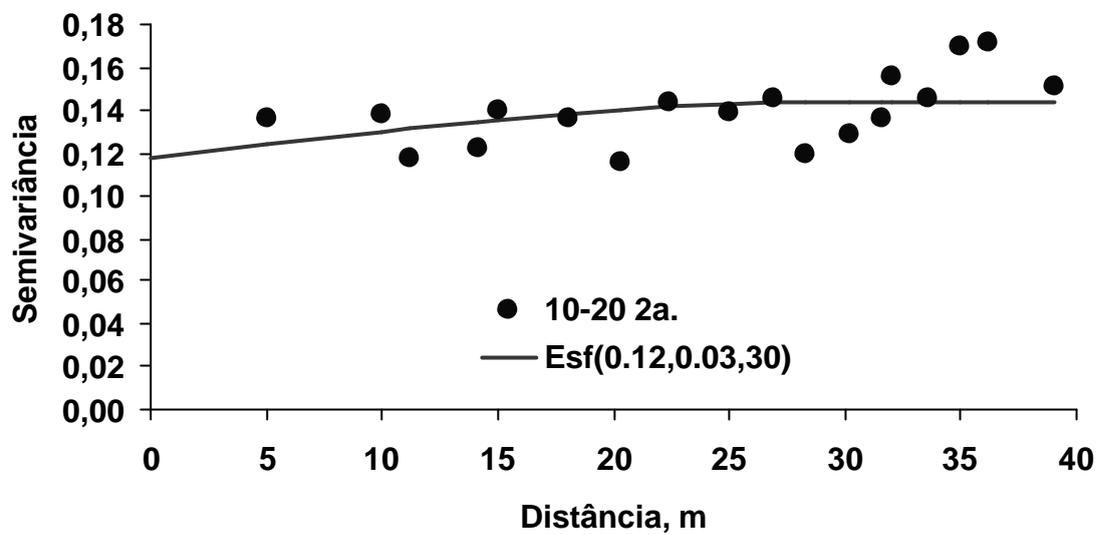


Figura anexo 4. Semivariograma dos valores da DMSR da profundidade 0,1-0,2 m na 2ª época de amostragem.

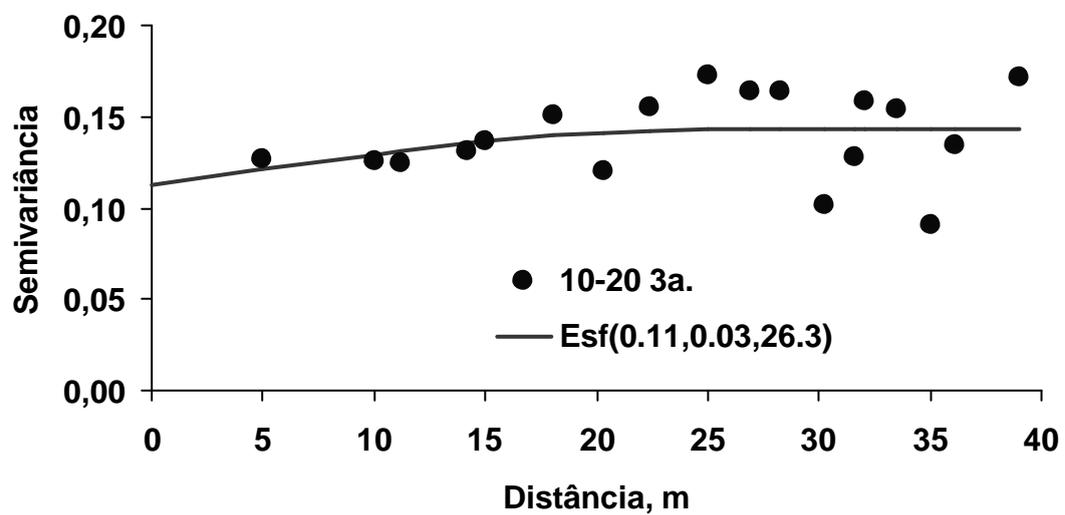


Figura anexo 6. Semivariograma dos valores da DMSR da profundidade 0,1-0,2 m na 3ª época de amostragem.

SEMIVARIOGRAMAS DIRECIONAIS- 0, 90, 45, -45.

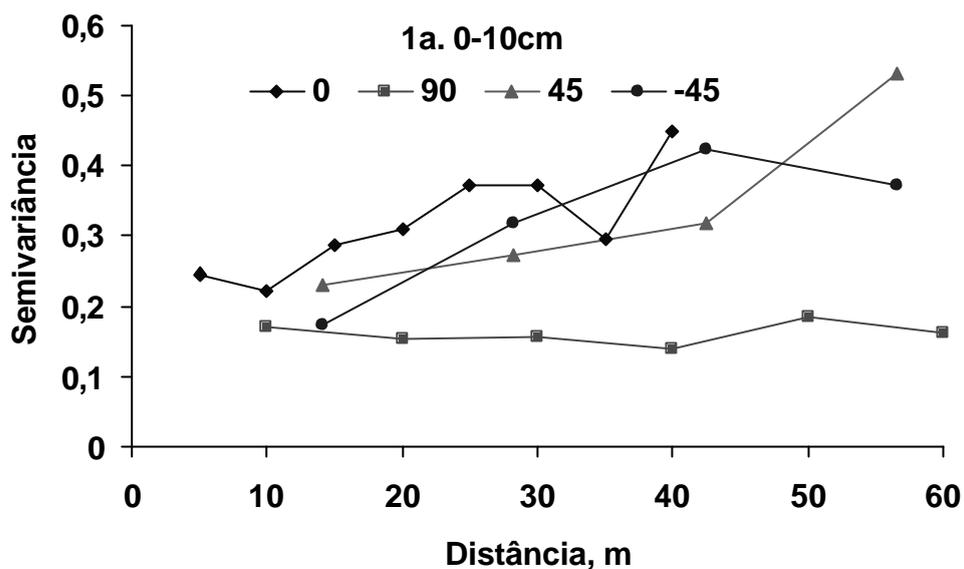


Figura anexo 7. Semivariogramas Direcionais da 1ª época de amostragem. 0-10

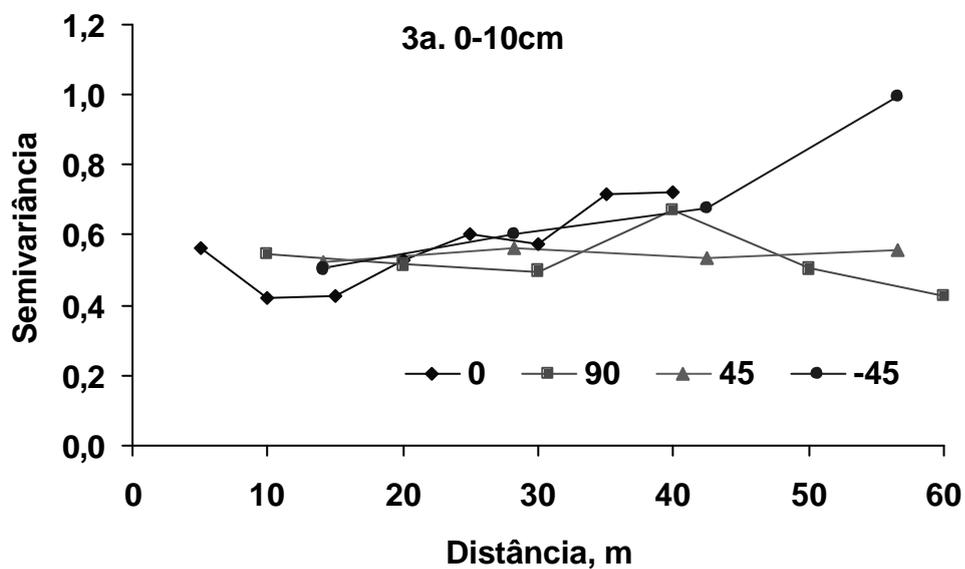


Figura anexo 8. Semivariogramas Direcionais da 3ª época de amostragem. 0-10

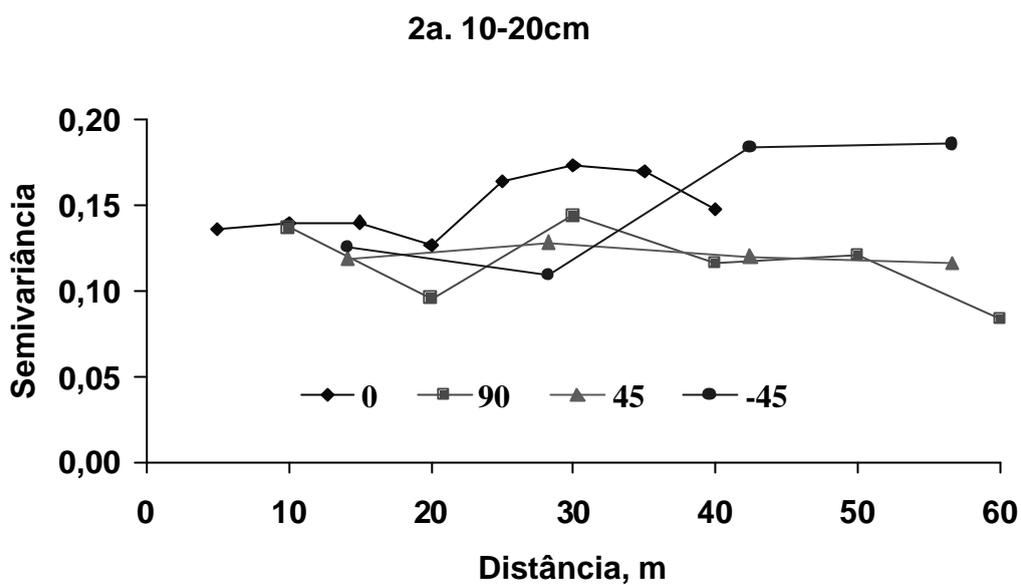


Figura anexo 8. Semivariogramas Direcionais da 2ª época de amostragem. 10-20

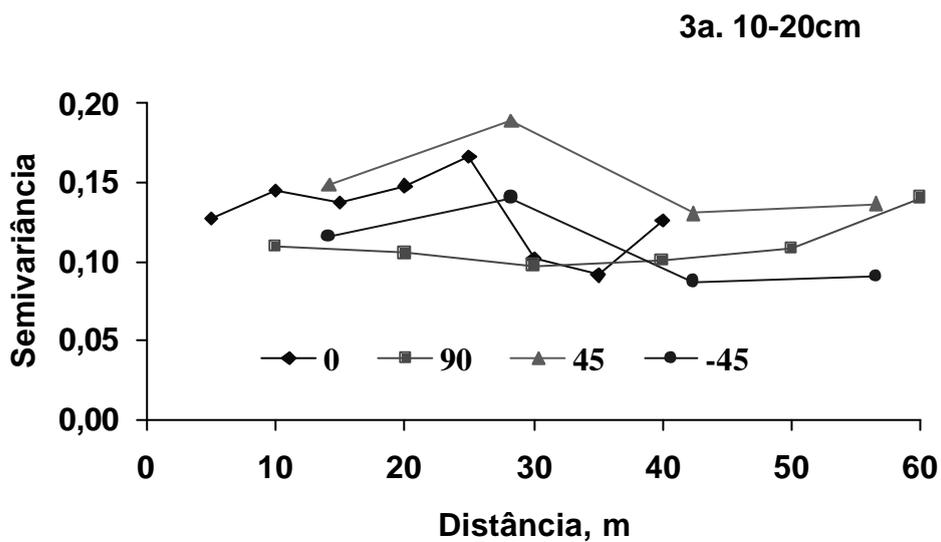


Figura anexo 9. Semivariogramas Direcionais da 3ª época de amostragem. 10-20

ANEXO IV – DESCRIÇÃO DO PERFIL DO CAPÍTULO 4.

Solo Predominante no Ensaio no Posto Experimental de Évora – Currais (Cardoso, 1965)

Perfil do Solo mediterrâneo pardo de dioritos ou quartzodioritos ou rochas microfaneríticas ou cristalofílicas afins (pm)

Horizonte A1 – 15 a 30 cm; pardo, pardo-pálido, cinzento-pardacento-claro ou pardo-acinzentado (s) e castanho, pardo-acinzentado-escuro ou cinzento-escuro (h); franco-argilo-arenoso, em muitos casos com alguns calhaus e pedras de rocha-mãe e/ou de pórfiros; estrutura granulosa muito fina a média moderada; friável; pH 6,0 a 7,0.

Transição nítida para

Horizonte B – 20 a 70 cm; pardo-acinzentado muito escuro ou castanho (h), passando por vezes, com a profundidade, a cinzento escuro e oliváceo, cores da rocha-mãe; argiloso às vezes franco-argiloso ou franco-argilo-arenoso, notando-se películas de argila na superfície dos agregados cuja abundância diminui com a profundidade; estrutura prismática grosseira forte composta de anisoforme angulosa grosseira forte; muito aderente, muito plástico, muito ou extremamente firme, extremamente rijo; pH 6,5 a 7,5.

Transição abrupta ou nítida para

Horizonte C – Material originário proveniente da desagregação de dioritos ou quartzodioritos ou rochas microfaneríticas ou cristalofílicas afins.

Tabela anexo 8. Dados Analíticos Físicos e Químicos dos solos Predominantes do Ensaio no Posto Experimental de Évora – Currais

Unid. e perfil	Horiz.	Prof. (cm)	> 2 mm (%)	< 2 mm				C Org. (%)	N Total (%)	pH	Catiões Permutáveis (m. e. 100 g)					V (%)	Dap seca ao ar	Poros. (%)	Cap. Máx. água (%)	Água Disp. (%)
				Areia grosseira (%)	Areia fina (%)	Limo (%)	Argila (%)				Ca	Mg	K	Na	H					
Pm-83	Ap	0-20		32,2	36,0	13,3	18,5	0,68	0,080	6,6	6,65	2,98	0,18	0,28	1,00	90,9	1,31	41,0	31,40	19,50
	B1	20-40		19,3	18,3	14,2	48,2	0,42	0,050	7,1	14,6	7,84	0,07	0,55	0,60	97,5	1,16	41,60	43,70	26,20
	B2	40-70		27,7	21,5	16,4	34,4	0,26	0,040	7,4	14,3	7,74	0,07	0,54	0,00	100	1,24	49,20	44,50	21,75
	C	70-100		55,6	28,3	5,8	10,3	0,04	0,010	7,7	16,9	5,88	0,04	0,56	0,00	100	1,43	43,10	30,20	5,57
Pm-90	Ap	0-20		33,1	31,3	16,8	16,8	0,71	0,079	6,2	5,34	2,56	0,25	0,39	2,00	81,0	1,30	27,50	23,52	15,00
	B2	20-90		13,9	15,2	20,9	50,0	0,54	0,050	7,1	18,2	5,30	0,16	0,50	0,00	100	1,14	47,30	52,30	
	B3	90-120		9,0	30,5	25,1	35,4	0,29	0,030	7,8	21,2	3,20	0,10	0,32	0,00	100	1,11	53,70	57,00	26,00
	C	120-160		14,3	45,5	21,2	19,0	0,16	0,018	8,1	28,0	1,20	0,09	0,90	0,00	100	1,11	51,70	50,00	17,80
Pmg-372	Ap	0-35	9,0	28,9	59,5	7,3	4,3	0,35	0,027	6,3	10,5	2,3	0,07	0,30	1,00	93,0	1,51	35,00	23,10	9,85
	B	35-90		25,3	23,5	13,1	38,1			7,1	22,7	9,9	0,09	0,42	1,10	96,8				
Pmg-374	Ap	0-30	3,0	46,5	37,1	11,3	5,1	0,60	0,038	6,2	8,84	Ves.	0,13	0,20	1,60	85,1	1,50	32,30	21,50	10,75
	B	30-60	4,0	31,2	31,5	8,5	28,6	0,32	0,032	7,0	12,8	2,30	0,15	0,34	1,00	93,9	1,28	43,50	35,60	13,27
Pgn-255	Ap	0-20		47,5	37,9	7,0	7,6	0,30	0,027	5,9	1,56	0,20	0,16	0,13	0,80	71,9	1,46	36,10	24,60	11,80
	B	20-50		45,8	32,4	7,6	14,2	0,20	0,019	6,2	4,22	0,74	0,19	0,19	1,00	84,3	1,40	39,10	28,00	15,40

Fonte: CARDOSO, J. V. J. C.; “ Os Solos de Portugal, Sua Classificação, Caracterização e Génese, 1 – A Sul do Rio Tejo”, 1965

