

JUCINEI JOSÉ COMIN

DESENVOLVIMENTO RADICULAR DO MILHO (*Zea mays* L.) E DA SOJA
(*Glycine max* (L.) Merrill) EM UM LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO APÓS
A IMPLANTAÇÃO DO PLANTIO DIRETO

Dissertação apresentada ao
Curso de Pós-Graduação em
Agronomia, Área de Concentra-
ção "Ciência do Solo" do Setor
de Ciências Agrárias da Uni-
versidade Federal do Paraná,
como requisito parcial a
obtenção do grau de Mestre
em Agronomia.

Prof. Orientador: IRACI SCOPEL

Curitiba

1992



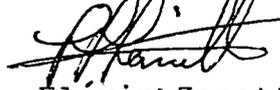
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA-ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
"CIÊNCIA DO SOLO"

P A R E C E R

Os Membros da Comissão Examinadora, designados pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo" para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo candidato JUCINEI JOSÉ COMIN, com o título: "DESENVOLVIMENTO RADICULAR DO MILHO (*Zea mays* L.) E DA SOJA (*Glycine max* (L.) Merrill) EM UM LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO APÓS A IMPLANTAÇÃO DO PLANTIO DIRETO" para obtenção do grau de Mestre em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo" do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após haver analisado o referido trabalho e arguido o candidato, são de Parecer pela "APROVAÇÃO" da Dissertação, com o conceito "A", completando assim, os requisitos necessários para receber o diploma de Mestre em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo".

Secretaria do Curso de Pós-Graduação em Agronomia-Área de Concentração "Ciência do Solo", em Curitiba, 09 de julho de 1992.


Prof. Dr. Iraci Scopel, Presidente.


Prof. Dr. Flávio Zanette, 1º Examinador.


Prof. Dr. Glaucio Roloff, 2º Examinador.



VIDA

"Sempre a indescorajada alma do homem
resoluto indo à luta.
(Os contingentes anteriores falharam?
Pois mandaremos novos contingentes
e outros mais novos).
Sempre o cerrado mistério
de todas as idades deste mundo
antigas ou recentes;
sempre os ávidos olhos, hurras, palmas de
boas-vindas, o ruidoso aplauso;
sempre a alma insatisfeita,
curiosa e por fim não convencida,
lutando hoje como sempre,
batalhando como sempre".

(Walt WHITMAN, 1819 - 1892)

Dedico a

GENTIL e JOVITA (amigos e pais)
DANI (amiga e companheira)

AGRADECIMENTOS

- Prof. Dr. Iraci Scopel, Prof. Ph.D. Glaucio Roloff e Prof. Dr. Flávio Zanette pela orientação no decorrer do trabalho, e pela amizade e confiança.
- Professores do Curso de Pós-Graduação pela atenção e sugestões.
- Amigos e irmãos Beto, Lu e Adri pelo apoio e estímulo.
- Amigos de todos os momentos.
- Aqueles que participaram durante alguma fase do trabalho e contribuíram para a realização do mesmo.
- Companheiros do Curso de Pós-Graduação, em destaque a Lutécia e o Cássio pelo auxílio na obtenção dos dados.
- Alberto Faiden e Lauro Mattei pelo apoio e amizade.
- Marcos e Geraldo pela convivência, amizade e apoio.
- Todos os Funcionários do Departamento de Solos que contribuíram para a realização do trabalho, em destaque os Funcionários Elda Nazaré Leite Lubasinski e Rui Barbosa da Silva.
- Eng^o Agr^o Ms.C. Gustavo Henrique Merten, Eng^o Agr^o Ms.C. Flávia Fontana Fernandes e Laboratorista Marli Vogler do IAPAR - Ponta Grossa - PR, pelo auxílio na geração dos dados.
- Assistente de Pesquisa Osmir José Lavoranti e Pesquisador Edilson Batista de Oliveira - EMBRAPA (Centro Nacional de Pesquisas Florestais - Colombo - PR) pela assessoria e elaboração das análises estatísticas.
- Departamento de Estatística da UFPR pelo auxílio prestado nas análises estatísticas.
- Funcionários da Biblioteca do Setor de Ciências Agrárias, em

destaque Liliana Luisa Pizzolato e Evelyn da Silva, pela atenção e orientação.

- Dirley pela digitação competente.

- Fundação ABC pelo apoio financeiro.

- Eng^o Agr^o João Carlos de Moraes de Sá (Fundação ABC) e Eng^o Agr^o Nelson Freire (Coop. Batavo) pelo apoio.

- Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

SUMÁRIO

1	<u>INTRODUÇÃO</u>	1
2	<u>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	4
2.1	RELAÇÕES ENTRE PARTE AÉREA E RAÍZES.....	4
2.2	DESENVOLVIMENTO E FUNÇÕES DO SISTEMA RADICULAR.....	6
2.2.1	Estrutura do sistema radicular.....	6
2.2.2	Absorção de água e nutrientes.....	7
2.3	FATORES FÍSICOS DO SOLO E O DESENVOLVIMENTO RADICULAR.....	9
2.3.1	Impedimento mecânico.....	9
2.3.2	Disponibilidade de água no solo.....	20
2.3.3	Aeração do solo.....	23
2.4	FATORES QUÍMICOS DO SOLO E O DESENVOLVIMENTO RADICULAR....	29
2.5	MODIFICAÇÕES DO PERFIL E DA ZONA RADICULAR.....	31
2.6	METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO SISTEMA RADICULAR.....	38
3	<u>MATERIAIS E MÉTODOS</u>	43
3.1	LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL.....	43
3.2	TRATAMENTOS.....	43
3.3	SISTEMA DE CULTIVO E MANEJO.....	46
3.4	COLETA DE AMOSTRAS DE RAÍZES.....	48
3.4.1	Lavagem e conservação de amostras.....	52
3.4.2	Determinação dos parâmetros radiculares.....	52
3.5	DETERMINAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....	53
3.6	DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE MATÉRIA SECA ADICIONADA AO SOLO PELO SISTEMA RADICULAR.....	54
3.7	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	55

4	<u>RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	56
4.1	CULTURA DE MILHO.....	56
4.1.1	Densidade de massa seca e de comprimento de raízes.....	56
4.1.1.1	Adição de matéria seca ao solo.....	67
4.1.2	Raio médio de raízes.....	68
4.1.3	Efeito da resistência à penetração na densidade de comprimento de raízes.....	74
4.1.4	Efeito da densidade do solo na densidade de comprimento de raízes.....	76
4.1.5	Efeito da porosidade de aeração na densidade de comprimento de raízes.....	76
4.1.6	Produtividade.....	79
4.1.7	Sensitividade do método do trado.....	80
4.2	CULTURA DE SOJA.....	81
4.2.1	Densidade de massa seca e de comprimento de raízes.....	81
4.2.2	Raio médio de raízes.....	89
4.2.3	Efeitos da densidade do solo, da resistência à penetração e da porosidade de aeração na densidade de comprimento de raízes.....	94
4.2.4	Produtividade.....	96
5	<u>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÃO</u>	98
6	<u>ANEXO I</u>	99
7	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	109

LISTA DE TABELAS

1	RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA NOS PREPAROS DE SOLO APÓS A INSTALAÇÃO DO EXPERIMENTO.....	44
2	RESULTADOS DA DENSIDADE DE PARTÍCULAS NOS TRATAMENTOS DE SOLO.....	45
3	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLO PREVIAMENTE À INSTALAÇÃO DO EXPERIMENTO.....	45
4	TRATAMENTOS DE PREPARO DE SOLO, DE CALAGEM E TRÁFEGO.....	46
5	ROTAÇÃO DE CULTURAS DURANTE O EXPERIMENTO.....	48
6	ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA DENSIDADE DE MASSA SECA, DA DENSIDADE DE COMPRIMENTO E DO RAIÓ MÉDIO DE RAÍZES EM RELAÇÃO A PREPAROS DE SOLO, A NÍVEIS DE CALCÁRIO, A DISTÂNCIA E A PROFUNDIDADE DE AMOSTRAGEM PARA A CULTURA DE MILHO.....	57
7	ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA DENSIDADE DE MASSA SECA, DA DENSIDADE DE COMPRIMENTO E DO RAIÓ MÉDIO DE RAÍZES EM RELAÇÃO A PREPAROS DE SOLO, A NÍVEIS DE CALCÁRIO, A DISTÂNCIA E A PROFUNDIDADE DE AMOSTRAGEM PARA A CULTURA DE SOJA.....	58
8	EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS DISTÂNCIAS DE AMOSTRAGEM EM FUNÇÃO DAS PROFUNDIDADES NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES DA CULTURA DE MILHO.....	61
9	EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS DISTÂNCIAS DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES DA CULTURA DE MILHO.....	62

10	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLO NO PRIMEIRO ANO DE IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO.....	64
11	MATÉRIA SECA ADICIONADA AO SOLO PELO SISTEMA RADICULAR DA CULTURA DE MILHO.....	67
12	EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS DISTÂNCIAS DE AMOSTRAGEM EM FUNÇÃO DAS PROFUNDIDADES NO RAIO MÉDIO DE RAÍZES DA CULTURA DE MILHO.....	70
13	EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS DISTÂNCIAS DE AMOSTRAGEM NO RAIO MÉDIO DE RAÍZES DA CULTURA DE MILHO.....	71
14	EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO (SIGNIFICÂNCIA DO TESTE t) NA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DE MILHO NO ANO AGRÍCOLA DE 89/90.....	79
15	RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLO NO SEGUNDO ANO DE IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO.....	87
16	EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DO TRÁFEGO EM FUNÇÃO DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES DA CULTURA DE SOJA.....	88
17	EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DO TRÁFEGO NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES DA CULTURA DE SOJA.....	89
18	EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DO TRÁFEGO EM FUNÇÃO DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NO RAIO MÉDIO DE RAÍZES DA CULTURA DE SOJA.....	93

19	EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DO TRÁFEGO RAIO MÉDIO DE RAÍZES DA CULTURA DE SOJA.....	94
20	EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DO TRÁFEGO (SIGNIFICANCIA DO TESTE t) NA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DE SOJA NO ANO AGRÍCOLA DE 90/91.....	97

LISTA DE TABELAS DO ANEXO I

I.1 EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS DISTANCIAS DE AMOSTRAGEM EM FUNÇÃO DAS PROFUNDIDADES NA DENSIDADE DE MASSA SECA DE RAÍZES DA CULTURA DE MILHO...	101
I.2 EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS DISTANCIAS DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE MASSA SECA DE RAÍZES DA CULTURA DE MILHO.....	102
I.3 EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DO TRÁFEGO EM FUNÇÃO DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE MASSA SECA DE RAÍZES DA CULTURA DE SOJA.....	107
I.4 EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DO TRÁFEGO NA DENSIDADE DE MASSA SECA DE RAÍZES DA CULTURA DE SOJA.....	108

LISTA DE FIGURAS

1a	CROQUI DA ÁREA EXPERIMENTAL COM A DISPOSIÇÃO DOS TRATAMENTOS.....	47
1b	CROQUI DA DISPOSIÇÃO DO TRÁFEGO NAS PARCELAS.....	47
2	TRADO UTILIZADO PARA A COLETA DE AMOSTRAS DE RAÍZES.....	49
3	DISTÂNCIA E PROFUNDIDADE DE AMOSTRAGEM PARA A CULTURA DE MILHO.....	50
4	DISTÂNCIA E PROFUNDIDADE DE AMOSTRAGEM PARA A CULTURA DE SOJA.....	51
5	EFEITOS DAS DISTÂNCIAS E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES DA CULTURA DE MILHO...	59
6	EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE COMPRIMENTO DE RAÍZES DA CULTURA DE MILHO.....	63
7	EFEITOS DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES DA CULTURA DE MILHO.....	65
8	EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES DA CULTURA DE MILHO.....	66
9	EFEITOS DAS DISTÂNCIAS E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NO RAIO MÉDIO DE RAÍZES DA CULTURA DE MILHO.....	69
10	EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NO RAIO MÉDIO DE RAÍZES DA CULTURA DE MILHO.....	72
11	EFEITOS DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NO RAIO MÉDIO DE RAÍZES DA CULTURA DE MILHO.....	72

12	EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NO RAIO MÉDIO DE RAÍZES DA CULTURA DE MILHO.....	73
13	EFEITO DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES DA CULTURA DE MILHO.....	75
14	EFEITO DA DENSIDADE DO SOLO NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES DA CULTURA DE MILHO.....	77
15	EFEITO DA POROSIDADE DE AERAÇÃO NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES DA CULTURA DE MILHO.....	78
16	EFEITOS DO TRÁFEGO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES DA CULTURA DE SOJA.....	82
17	EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DO TRÁFEGO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES DA CULTURA DE SOJA.....	84
18	EFEITOS DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO, DO TRÁFEGO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES DA CULTURA DE SOJA.....	85
19	EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES DA CULTURA DE SOJA.....	86
20	EFEITOS DO TRÁFEGO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NO RAIO MÉDIO DE RAÍZES DA CULTURA DE SOJA.....	90
21	EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DO TRÁFEGO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NO RAIO MÉDIO DE RAÍZES DA CULTURA DE SOJA.....	91

22	EFEITOS DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO, DO TRÁFEGO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NO RAIÓ MÉDIO DE RAÍZES DA CULTURA DE SOJA.....	91
23	EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NO RAIÓ MÉDIO DE RAÍZES DA CULTURA DE SOJA.....	92
24	EFEITOS DA DENSIDADE DO SOLO, DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO E DA POROSIDADE DE AERAÇÃO NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES DA CULTURA DE SOJA.....	95

LISTA DE FIGURAS DO ANEXO I

I.1 EFEITOS DAS DISTÂNCIAS E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE MASSA SECA DE RAÍZES DA CULTURA DE MILHO.....	100
I.2 EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE MASSA SECA DE RAÍZES DA CULTURA DE MILHO.....	103
I.3 EFEITOS DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE MASSA SECA DE RAÍZES DA CULTURA DE MILHO.....	103
I.4 EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE MASSA SECA DE RAÍZES DA CULTURA DE MILHO.....	104
I.5 EFEITOS DO TRÁFEGO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE MASSA SECA DE RAÍZES DA CULTURA DE SOJA....	104
I.6 EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DO TRÁFEGO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE MASSA SECA DE RAÍZES DA CULTURA DE SOJA.....	105
I.7 EFEITOS DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO, DO TRÁFEGO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE MASSA SECA DE RAÍZES DA CULTURA DE SOJA.....	105
I.8 EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE MASSA SECA DE RAÍZES DA CULTURA DE SOJA.....	106

RESUMO

Caracterizou-se o sistema radicular da cultura de milho na safra 89/90 e de soja na safra 90/91, em um Latossolo Vermelho-Escuro situado na Estação Experimental da Cooperativa Batavo, localizada em Carambeí- Ponta Grossa- PR, após a implantação do sistema de plantio direto, através da determinação da densidade de massa seca, da densidade de comprimento e do raio médio de raízes. Utilizou-se o método do trado para a coleta de amostras de raízes em seis pontos em cada sub-parcela e em intervalos de profundidade de 10 cm para a cultura de milho, e em quatro pontos e em quatro intervalos de profundidades para a cultura de soja. Previamente à implantação do sistema o solo foi submetido a dois métodos de preparo de solo (arado de discos à profundidade de 20 cm e arado rotativo à profundidade de 60 cm), a dois níveis de calagem (sem calcário adicional e com calcário para atingir 70% de saturação de bases) e ao controle de tráfego (linhas permanentemente isentas de tráfego e linhas com tráfego). Os efeitos dos preparos de solo e dos níveis de calcário não foram significativos, porém observou-se uma tendência de maior rendimento na cultura de milho no preparo de solo a 20 cm. O efeito do tráfego ficou confinado à camada de solo de 0-10 cm e afetou significativamente os parâmetros radiculares da cultura de soja avaliados nesta mesma camada, com o preparo de solo a 60 cm tendendo ser mais sensível ao tráfego. Houve tendência de maior rendimento na cultura de soja nas linhas sem tráfego. Confirmou-se nas condições do experimento, a baixa sensibilidade do método do trado para a detecção de possíveis diferenças entre os tratamentos.

ABSTRACT

Root systems of corn (1989/90 season) and soybeans (1990/91 season) in the first two years of no-tillage were quantified by dry mass density, length density and average root radius. The experiment was conducted on a medium-textured Dusky Red Latosol located at the Batavo Experiment Station, Ponta Grossa, State of Paraná. The auger method was used to collect corn root samples in six points with 10 cm depth increments and soybean root samples in four points with four depth intervals, for every sub-plot. Previous to no-tillage the soil was tilled either by disk plow at 20 cm or rotary plow at 60 cm, under two lime levels - with additional lime for 70% base saturation or without, and two traffic levels - with machinery traffic and without. Effects of tillage depth and liming were not significant, but there was a tendency for higher corn yields for plots tilled at 20 cm. Traffic effects were restricted to the 0-10 cm layer and significantly affected soybean root parameters, with the 60 cm tillage depth being more sensitive to traffic effects. Soybean yields tended to be higher under no traffic. The low sensitivity of the auger method did not allow the detection of significant differences among treatments.

1. INTRODUÇÃO

Os objetivos dos sistemas de cultivo mínimo de solo são diminuir o tempo, a quantidade e os custos de trabalho com máquinas, a sua potência, reduzindo as perdas de umidade, o tráfego e a erosão pela água e/ou pelo vento (THROCKMORTON, 1986; OLIVEIRA, 1990). Estes sistemas possibilitam uma boa colocação de sementes, o controle de plantas invasoras e aumentam a infiltração de água, diminuindo a evaporação e as perdas de solo pela erosão (THROCKMORTON, 1986).

O sistema de plantio direto pode ser definido como a técnica de colocação de sementes em sulco ou cova em solo não revolvido. O tráfego de máquinas e implementos apesar de menos intensivo, pode afetar toda a área cultivada causando aumento da compactação do solo. Operações com maquinaria pesada compactam o solo, resultando em condições desfavoráveis para o desenvolvimento das plantas devido ao impedimento mecânico do crescimento de raízes, aeração deficiente, reduzida infiltração de água e deficiência nutricional (VOORHEES, 1983; CASTRO et al., 1987).

Muito embora o sistema de plantio direto seja bastante efetivo sob condições tropicais, onde os sistemas de cultivo convencionais aceleram as perdas de solo devido à erosão hídrica (LAL, 1976), o desenvolvimento vegetativo e o rendimento de grãos em solos não revolvidos pode não ser maior do que em solos cultivados com técnicas convencionais. Ocasionalmente, o desenvolvimento de plantas em solos não revolvidos é retardado,

apresentando sintomas de deficiência nutricional devido à elevada resistência do solo à penetração, à baixa porosidade e à inadequada distribuição de nutrientes no perfil, que reduzem o crescimento de raízes em profundidade (MAURYA e LAL, 1980). A disponibilidade de nutrientes no solo depende também da intensidade de mobilização e colocação de fertilizantes por ocasião da implantação das culturas. Uma menor intensidade e profundidade de cultivo tende a desenvolver uma maior concentração de nutrientes próxima à superfície do solo (OLIVEIRA, 1985), o que favorece a concentração de raízes próximo à superfície do solo.

Pelo exposto, evidencia-se a necessidade da adequação das condições físicas e químicas do solo, previamente à implantação do sistema de plantio direto, bem como, do acompanhamento do comportamento destas condições com o tempo. O conhecimento dos processos envolvidos na alteração do perfil de solo e do seu comportamento com o tempo, possibilitam atuar no aumento da produção das culturas, principalmente, através da promoção de zonas mais favoráveis ao crescimento, proliferação e atividade radicular (ECK e UNGER, 1985).

O presente trabalho tem por objetivos a caracterização do comportamento do sistema radicular da cultura de milho e de soja nos dois primeiros anos de adoção do sistema de plantio direto, em um Latossolo Vermelho-Escuro, em função dos preparos de solo e da calagem prévios à implantação do sistema, do tráfego de máquinas, das distâncias e das profundidades de amostragem, através de um método de avaliação do sistema radicular que cause danos mínimos

às parcelas experimentais, visto que este trabalho faz parte de um projeto de longo prazo (seis anos) em parcelas individuais de 5 x 20 m...

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. RELAÇÕES ENTRE PARTE AÉREA E RAÍZES

O crescimento de plantas depende de uma estreita interdependência entre parte aérea e raízes. Estas absorvem água e nutrientes, enquanto aquelas originam metabólitos orgânicos. As raízes são importantes órgãos de síntese de alguns hormônios que regulam o crescimento das plantas, por exemplo citocininas, giberelinas e etileno. Assim, o sistema radicular não pode ser visto meramente como órgão de absorção. Muitos aspectos fisiológicos do crescimento de raízes permanecem pouco entendidos, porém os efeitos do ambiente do solo nas partes aéreas das plantas manifesta-se, frequentemente, devido a uma modificação do mecanismo hormonal nas raízes, da mesma forma que as respostas hormonais iniciadas nas partes aéreas podem influenciar profundamente o funcionamento das raízes (RUSSEL, 1981). Quando uma certa quantidade da parte aérea é removida, observa-se uma aceleração do seu crescimento em relação ao crescimento das raízes, até que um balanço seja novamente encontrado entre fotossintatos, hormônios de crescimento, água e minerais da planta. Da mesma forma, quando parte do sistema radicular é danificado, o crescimento das raízes acelera até que esse balanço seja novamente encontrado (TAYLOR e ARKIN, 1981).

A transpiração e a produção de metabólitos na parte aérea afetam o crescimento radicular. O crescimento da parte aérea pode

ser considerado ótimo quando a máxima energia solar é interceptada pelas folhas e utilizada na síntese de carboidratos. Para as raízes, isto não é necessariamente verdadeiro. Se o sistema radicular é suficientemente extenso para prover de água, de nutrientes e de hormônios a parte aérea, nenhum aumento adicional do seu tamanho beneficiará a planta (RUSSEL, 1981). Sistemas radiculares extensos não são pré-requisitos para a máxima produção da planta, quando água e nutrientes forem supridos na taxa de demanda da planta. Sob condições de restrição, entretanto, estes sistemas radiculares podem absorver mais água e/ou nutrientes. Desta forma, um bom desenvolvimento de raízes pode permitir a máxima produção da cultura num ambiente variável (WILLIGEN e NOORDWIJK, 1987).

Esforços têm sido feitos para caracterizar a distribuição de raízes de culturas comercialmente importantes em diversas condições de solo e em diferentes estágios de crescimento. Além disso, procura-se também determinar as condições de solo que contribuem para o ótimo crescimento radicular e as maneiras de modificá-las para aumentar a distribuição de raízes no perfil. A hipótese de que um maior volume de solo explorado conduzirá a uma maior absorção de água e nutrientes tem sido sustentada, visto que, desse modo, o risco de déficits de água e nutrientes será menor, e poderá conduzir a um maior desenvolvimento da planta com conseqüente aumento nos rendimentos (BROWN e SCOTT, 1984).

2.2. DESENVOLVIMENTO E FUNÇÕES DO SISTEMA RADICULAR

2.2.1. Estrutura do sistema radicular

Os vegetais superiores apresentam sistemas radiculares bastante diferenciados, compostos por vários tipos de raízes: primárias, secundárias, pivotantes ou laterais (CALLOT et al., 1982). O número de eixos de raízes provenientes da plântula ou da base do caule varia amplamente entre as espécies, e geralmente as ramificações laterais desenvolvem-se nestas raízes a curtas distâncias após sua ponta. Funcionalmente, as raízes laterais assemelham-se aos eixos que as suportam, mas diferenciam-se em dois importantes aspectos: são menores em diâmetro e em comprimento, e não apresentam geotropismo positivo. As raízes laterais crescem primeiro horizontalmente ou em direção à superfície do solo, e após certo tempo, desviam seu crescimento para baixo. Este comportamento faz com que a densidade de raízes seja maior próximo à superfície do solo. Em plantas anuais ou bienais, dificilmente as raízes ocupam mais do que 5% do volume de solo na camada de até 15 cm, e a 50 cm elas não representam mais do que 0,1% (RUSSEL, 1981). Também influenciam para este comportamento, as condições, geralmente, mais adequadas ao desenvolvimento radicular na camada superficial de solo, como: disponibilidade de nutrientes, aeração e atividade biológica (MITCHELL e RUSSEL, 1971; BARBER, 1978; BARRETO, 1991).

2.2.2. Absorção de água e nutrientes

Os nutrientes essenciais para as funções metabólicas das plantas são absorvidos pelas raízes, provenientes da solução do solo em contato com a sua superfície. Assim, a absorção de ions é uma função do crescimento radicular, da área superficial de raízes e da concentração de ions em formas prontamente disponíveis (NYE e TINKER, 1977). Da quantidade de água que entra pelas raízes, somente uma pequena fração é utilizada no seu metabolismo. As plantas requerem quantidades de água consideráveis devido ao processo de transpiração. A transpiração pelas folhas é a principal força de pressão para o movimento da água na planta. O gradiente diferencial entre a superfície externa dos estômatos e do solo ao redor das raízes promove a absorção e o transporte de água para as partes aéreas (RUSSEL, 1981).

Segundo CALLOT et al. (1982) duas raízes em atividade máxima podem absorver uma quantidade de elementos comparável àquela absorvida pela totalidade do sistema radicular. Assumindo-se entretanto que a taxa de absorção em condições normais é uma relação direta da quantidade de raízes expostas para absorção de fósforo e/ou potássio, por exemplo, um decréscimo no número de raízes expostas a estes elementos poderá diminuir suas concentrações na planta.

Atualmente sabe-se que as raízes de cereais com algumas semanas de idade absorvem nitrogênio, fósforo e potássio por todas as partes do sistema radicular. Isto elimina a idéia de que a

absorção de nutrientes é somente possível na zona apical, onde as paredes das células são delgadas e o seu conteúdo citoplasmático é abundante (RUSSEL, 1981). A absorção de elementos, como o fósforo e o potássio, sofre uma ligeira diminuição com a idade das raízes. As variações podem ser explicadas pela relação da idade da planta com a idade média das raízes, pois a porção jovem de raízes, em contínua renovação enquanto o sistema radicular cresce, atenua a influência do envelhecimento da outra parte sobre a capacidade de absorção (CALLOT et al., 1982.).

BARBER (1984), por outro lado, verificou em experimento em solução nutritiva que a taxa de absorção de fósforo por cm de raiz, em função da idade da planta e do arranjo das raízes, atingiu um pico máximo aos 25 dias, declinando rapidamente com a idade da planta. Sob condições de campo, o comportamento foi similar com a idade. A taxa de absorção média decresceu rapidamente para todos os nutrientes com a idade da planta e, após um certo tempo, permaneceu relativamente constante (MENGEL e BARBER, 1974). A redução verificada na taxa de absorção com a idade não significa uma redução na demanda da planta por unidade de raiz, mas reflete uma redução na possível taxa de absorção de nutrientes pelas raízes.

2.3. FATORES FÍSICOS E O DESENVOLVIMENTO RADICULAR

2.3.1. Impedimento mecânico

As plantas requerem um sistema radicular apenas o suficiente para absorver água e nutrientes necessários para o seu desenvolvimento. Em muitos solos e climas, isto requer uma alta densidade de raízes próximas à superfície onde as concentrações da maioria dos nutrientes são maiores, e pelo menos uma raiz por planta, penetrando em profundidade no subsolo, para extrair a água armazenada (DEXTER, 1988).

Camadas de solo com impedimentos ao crescimento radicular podem distorcer as densidades radiculares normais. Em muitas culturas estas densidades são aproximadamente exponenciais, com valores máximos na superfície em torno de 10 cm de raiz/cm³ de solo para cereais. No subsolo próximo a 1m de profundidade, estas densidades radiculares podem ser somente de 1cm/cm³ ou menos (DEXTER, 1988). A compactação do solo tende a aumentar a densidade radicular na superfície do solo pelo aumento da emissão de raízes laterais e a diminuir a profundidade de enraizamento no perfil (CINTRA, 1980; SILVA, 1980; CINTRA e MIELNICZUK, 1983).

Para desenvolver tal sistema radicular a planta deve explorar os poros existentes no solo, de tamanho adequado, ou deve fazer novos poros vencendo a resistência do solo e deslocando a ponta da raiz para frente, através do aumento da pressão de crescimento. As pontas das raízes geralmente são incapazes de entrarem em poros

rígidos, menores do que seu diâmetro (WIERSUM, 1957). Entretanto, se o solo for deformável, as raízes devem ser capazes de alargar os poros existentes enquanto ainda absorvem água e nutrientes. As raízes capilares (normalmente 10 μm de diâmetro), importantes na absorção de nutrientes, são consideradas incapazes de formarem os seus próprios poros, requerendo assim poros pré-existentes iguais ou maiores do que elas próprias (DEXTER, 1988).

O impedimento mecânico, normalmente, causa um aumento no diâmetro de raízes (TAYLOR, 1974; AUBERTIN e KARDOS, 1965). Restrição mecânica dos eixos principais de raízes causa uma considerável proliferação de raízes laterais finas, desde que os poros sejam grandes o suficiente para recebê-las (RUSSEL e GOSS, 1974).

A pressão de crescimento de raízes por unidade de área da seção transversal é denominada pressão axial, e por unidade de superfície lateral é denominada pressão radial (TAYLOR e RATLIFF, 1969a). As pressões máximas que uma raiz pode exercer para crescer, foram primeiramente medidas nos clássicos experimentos de Pfeffer (GILL e BOLT, 1955; BARLEY, 1962). As pressões radiais foram ao redor de 0,5 MPa, e as pressões axiais foram ao redor de 1,2 MPa.

TAYLOR e RATLIFF (1969a), estudando a pressão de crescimento de raízes de algodão, de ervilha e de amendoim, encontraram que a pressão máxima exercida pelas raízes variava de 0,9 até 1,3 MPa. WHITELEY et al. (1981); MISRA et al. (1986), verificando o resultado de vários experimentos, citam os mesmos valores médios.

As pressões críticas para a deformação cilíndrica em solos homogeneamente deformáveis, são de aproximadamente 0,5 a 0,8 MPa e para a deformação esférica, de 1,6 a 2,4 MPa (GREACEN et al. 1968, citados por TARDIEU, 1989).

GILL e MILLER (1956), analisando a interação entre o impedimento mecânico e o suprimento de oxigênio em raízes de milho em um meio artificial submetido a uma pressão de 0,15 MPa, verificaram que a alongação das raízes cessou quando a concentração de oxigênio foi reduzida para 1%. BARLEY (1962) verificou que o efeito combinado do impedimento mecânico e do déficit de oxigênio em um meio artificial foi mais adverso do que os efeitos produzidos por estes fatores atuando isoladamente. Um aumento da resistência ao crescimento radicular de zero para 0,05 MPa, reduziu em aproximadamente 31% a taxa de crescimento das raízes quando a concentração de oxigênio foi de 20%, e quando a concentração de oxigênio foi de 5%, a taxa de crescimento foi reduzida em cerca de 50%. A interação entre impedimento mecânico e potencial mátrico foi verificada por TAYLOR e RATLIFF (1969b). A taxa de crescimento das raízes não dependeu do potencial mátrico, mas da resistência à penetração. BAR-YOSEF e LAMBERT (1981), entretanto, verificaram uma clara interação entre o impedimento mecânico e o potencial de água do solo. VEEN e BOONE (1990) verificaram inibição completa do crescimento das raízes de milho quando a resistência à penetração foi de 4,2 MPa e o potencial mátrico - 1,7 MPa, o que sugere efeito sinérgico do potencial de água no solo e da resistência à penetração.

Do ponto de vista do entendimento de como o impedimento mecânico afeta a exploração do solo pelas raízes, o estudo da pressão máxima que as raízes podem exercer é de menor interesse do que a determinação da pressão mínima aplicada que reduz apreciavelmente a sua extensão (RUSSEL e GOSS, 1974). Estes autores determinaram a pressão mínima, em um meio artificial, que causou danos às raízes de milho. O comprimento radicular foi reduzido cerca de 50% com 0,02 MPa de pressão e 80% com 0,05 MPa. Experimentos com outras espécies mostraram algumas diferenças. A taxa de crescimento dos eixos das raízes de milho foi reduzida para 69% em uma pressão de 0,025 MPa em relação às plantas não impedidas, enquanto que para cevada a redução foi de 43%. GOSS (1977) verificou redução no crescimento de cevada de 80% com uma resistência de 0,05 MPa. Raízes de milho, crescendo em meio artificial, com pressões aplicadas de 0,04 MPa, tiveram redução de 75% no seu comprimento e aumento de cerca de 50% no seu diâmetro, quando comparadas com as raízes de plantas não impedidas (VEEN, 1982). Outro experimento, também utilizando cevada, onde pressões de 0,02 MPa foram aplicadas, apresentou 40% de redução no crescimento das raízes. A redução somente foi verificada onde as raízes não encontraram poros maiores do que o seu diâmetro (LINDBERG e PETERSSON, 1985).

De acordo com STOLZY e BARLEY (1968); EAVIS e PAYNE (1969), a determinação da resistência ao crescimento de raízes deveria ser feita por medidas diretas. Porém, devido às dificuldades práticas, uma das formas comuns de se estimar a resistência do solo à

penetração é através do uso de penetrômetros (GREACEN e OH, 1972). Esta resistência ao penetrômetro ou índice de cone (IC), é determinada pela relação da força de penetração do cone no solo e da sua área da seção transversal (BRADFORD, 1986). A resistência à penetração depende da densidade do solo e da umidade, sendo que a mesma cresce com o incremento da densidade e da tensão de água no solo (MIRREH e KETCHESON, 1972; CASSEL et al., 1978; GROENEVELT et al., 1984; VEPRASKAS et al., 1986).

Comparações entre as pressões axiais ou cilíndricas experimentadas pelas raízes ao penetrar o solo, com as pressões experimentadas pelo cone metálico, mostram que as pressões medidas pelo cone de metal são apreciavelmente maiores do que as experimentadas pelas raízes. Porém, quando as pontas das raízes são sujeitas a um impedimento mecânico, elas freqüentemente são ancoradas pelas raízes capilares, fazendo com que as comparações sejam vistas como qualitativas (STOLZY e BARLEY, 1968; EAVIS e PAYNE, 1969). TAYLOR e GARDNER (1963) verificaram que o coeficiente de correlação entre a resistência do solo, determinada através de penetrômetro, e a penetração de raiz foi maior do que entre a densidade do solo e a penetração de raiz. Eles concluíram que o fator crítico que controla a penetração de raízes no solo é a resistência à penetração. BLANCHARD et al. (1978) constataram que o comprimento radicular de ervilha apresentou o mesmo comportamento, relacionando-se mais com a resistência à penetração.

Valores considerados críticos para a penetração de raízes,

determinados através de penetrômetros, variam entre 0,8 e 5,0 MPa, dependendo do tipo de solo, do potencial de água e das espécies de plantas (BARLEY e GREACEN, 1967; GREACEN et al., 1969). Diferenças estruturais no perfil de solo propiciam diferenças nos valores críticos medidos pelos penetrômetros. Verificou-se num experimento que resistências de 3,6 MPa impediram o crescimento radicular de aveia no horizonte Ap. No entanto, o valor crítico aumentou para 5,0 MPa no sub-solo, sob plantio direto, devido à presença de poros contínuos, formados através de canais oriundos de raízes velhas e túneis de minhocas, que não foram detectados pelo penetrômetro (EHLERS et al., 1983).

ORTALANI et al. (1982), em experimento com soja, notaram que à medida que a resistência à penetração aumentou de 0,45 MPa para 1,49 MPa, a produção de grãos diminuiu pela metade. CINTRA e MIELNICZUK (1983), trabalhando com diversas espécies de plantas em um Latossolo Roxo compactado, em vasos, encontraram valores de resistência à penetração de 1,1 MPa impedindo o crescimento radicular de algumas espécies, e de 1,8 MPa impedindo o crescimento de todas as espécies. TAYLOR e GARDNER (1963) verificaram que em resistência à penetração de 2,0 MPa não ocorreu penetração de raízes de algodão no solo. TAYLOR e BURNETT (1964); TAYLOR et al. (1966), também utilizando algodão, encontraram valores de resistência de 2,5 a 3,0 MPa limitando drasticamente ou impedindo a penetração de raízes. TAYLOR e RATLIFF (1969b) encontraram reduções de 50% na velocidade de alongação de raízes de algodão e de amendoim, em valores de resistência entre 0,7 e

2,0 MPa, respectivamente. O crescimento de raízes de feijão, em resistência de 2,0 MPa também foi reduzido em 50%, e de algodão, em resistência de aproximadamente 2,5 MPa, foi completamente inibido (GERARD et al., 1972). Resistência à penetração de 1,5 MPa reduziu cerca de 50% a taxa de crescimento radicular de milho (BOONE e VEEN, 1982). HEMSATH e MAZURAK (1974) encontraram resistência de 2,0 MPa como valor crítico à penetração de raízes de sorgo. NESMITH et al. (1987) relataram valores críticos de resistência ao redor de 2,0 MPa para soja. OLIVEIRA (1967), estudando a ocorrência de adensamentos em cinco perfis de solo de tabuleiro do Nordeste, verificou que em todos os perfis as raízes das plantas mudavam para a direção horizontal, quando atingiam as camadas compactadas. CINTRA et al (1983), caracterizando o impedimento mecânico em um Latossolo Roxo, verificaram valores de densidade do solo de até $1,59 \text{ g/cm}^3$ e de resistência à penetração de até 2,3 MPa, que poderiam causar restrições ao crescimento do sistema radicular de culturas. PEDÓ (1986) verificou restrição ao crescimento de raízes de soja, de milho e de caupi em valores de aproximadamente 1,5 MPa de resistência à penetração.

Os resultados de experimentos, envolvendo comparação direta da resistência ao penetrômetro e à raiz, indicam que os penetrômetros medem uma resistência de duas a oito vezes maior do que as raízes efetivamente encontram (MISRA et al., 1986; WHITELEY et al., 1981; BENGOUGH e MULLINS, 1990).

A densidade do solo também pode ser utilizada como outro parâmetro para avaliar restrição mecânica ao crescimento radicular

(BAUDER et al., 1981; THOMPSON et al., 1987), apesar de sua menor correlação com crescimento radicular. Esta pode variar de menos que $1,00 \text{ g/cm}^3$ até valores superiores a $1,70 \text{ g/cm}^3$ (CASSEL e BAVER, 1975). Os valores críticos de densidade do solo variam para cada tipo de solo considerado (ZIMMERMANN e KARDOS, 1961; JONES, 1983). Restrição física ao crescimento radicular de arroz foi avaliada por GROHMANN e QUEIROZ NETO (1966), onde valores superiores a $1,38 \text{ g/cm}^3$ e $1,42 \text{ g/cm}^3$ foram restritivos num Podzólico Vermelho-Amarelo e num Latossolo Roxo, respectivamente. Num solo argiloso, o crescimento das raízes de milho diminuiu de forma linear com o aumento de densidade do solo de $0,94 \text{ g/cm}^3$ para $1,30 \text{ g/cm}^3$ (PHILLIPS e KIRKHAM, 1962). VEIHMEYER e HENDRICKSON (1948) encontraram como limites críticos de densidade do solo para o crescimento das raízes de girassol, valores de $1,75 \text{ g/cm}^3$ em solos arenosos, e entre $1,46$ e $1,63 \text{ g/cm}^3$ em solos argilosos. SCHUURMAN (1965) considerou como densidade crítica, os valores de $1,65 \text{ g/cm}^3$ em solos arenosos, e $1,50 \text{ g/cm}^3$ em solos de textura média. BORGES et al. (1988), estudando as respostas de variedades de soja à compactação, verificaram reduções na capacidade de penetração das raízes à medida que o solo foi compactado até a densidade de $1,15 \text{ g/cm}^3$. Em densidades de $1,25 \text{ g/cm}^3$ a penetração das raízes foi pequena, e foi zero em valores de $1,35 \text{ g/cm}^3$.

FREITAS (1988), trabalhando com agregados cúbicos de 25 mm e 50 mm de solo siltoso, com três diferentes densidades ($1,40$; $1,60$ e $1,80 \text{ g/cm}^3$), verificou diferenças no padrão de crescimento radicular de milho para todas as densidades. No meio composto por

agregados de $1,40 \text{ g/cm}^3$, as raízes cresceram preferencialmente através dos poros dentro dos agregados, principalmente em maior profundidade. Com os agregados de alta densidade, o caminho preferido foi nos poros entre agregados. No solo com agregados de média densidade ($1,60 \text{ g/cm}^3$), o crescimento radicular inicialmente ocorreu através dos macroporos, mudando para os microporos em profundidade. VOORHEES et al. (1971), num trabalho similar, constatou que as raízes de cevada cresceram dentro de agregados de $1,40 \text{ g/cm}^3$. Nos agregados de $1,80 \text{ g/cm}^3$, o caminho encontrado para crescimento foi entre eles. Deste modo, VOORHEES (1983) considerou que a densidade do solo não contempla os planos de fraqueza provenientes dos ciclos de umedecimento e secagem.

Segundo GILL e VANDENBERG (1968), citados por FREITAS (1988), a densidade e a resistência devem ser estudadas sob diferentes perspectivas. A densidade do solo é uma propriedade pouco dinâmica, usada para descrever a condição e o estado atual de um solo, sem considerar suas reações. É um parâmetro relacionado à compactação e ao espaço poroso total. A resistência do solo, por outro lado, é uma propriedade dinâmica, influenciada por vários tipos de forças, tais como aquelas provenientes dos ciclos de secamento e umedecimento, dos implementos agrícolas, da carga do trator, do tráfego de animais e do crescimento de raízes. A resistência à penetração, também é altamente dependente do conteúdo de água, da densidade do solo e da composição granulométrica. A resistência do solo aumenta com o aumento da densidade do solo, e reflete a história anterior de manejo e seus

efeitos sobre a estrutura do solo. A resistência também aumenta com o decréscimo da umidade do solo, como uma indicação de equilíbrio entre as forças de coesão/adesão atuando no solo.

BARLEY (1962) tentou explicar a redução no crescimento de raízes pelo aumento dos níveis de resistência mecânica em termos de ajustamento osmótico. BARLEY e GREACEN (1967); GREACEN e OH (1972) também adotaram o conceito de ajustamento osmótico. Estes consideraram que a eficiência do ajustamento osmótico foi de 70% para o impedimento mecânico e 100% para potenciais de água abaixo de -0,8 MPa. Algumas respostas ao impedimento mecânico podem ser explicadas em termos de regulação osmótica. Por exemplo, a pressão máxima que as raízes podem exercer são comparáveis à pressão osmótica de expansão das suas células. Porém, muitos aspectos destas respostas, especialmente a baixas pressões, não podem ser explicadas desta maneira. Os dados de GREACEN e OH (1972), segundo RUSSEL e GOSS (1974), não sustentam suas hipóteses. GREACEN (1986), citado por BENGOUGH e MULLINS (1990), argumentou que qualquer discrepância nos resultados pode ter sido causada pelo alto grau de variabilidade associado ao comportamento das raízes.

BARLEY (1976) sugeriu que a ação de reguladores hormonais é o mecanismo responsável pelo comportamento de raízes frente ao impedimento mecânico. KAYS et al. (1974) verificaram um aumento de seis vezes na concentração de etileno quando as raízes sofreram restrição mecânica. VEEN (1982) verificou a deposição de microfibrilas de celulose, paralelamente ao eixo da célula, em raízes crescendo sob condições de elevada resistência mecânica.

Isto promoveu inibição no seu crescimento longitudinal, favorecendo o crescimento lateral das raízes e o início da produção de etileno. As respostas de raízes às condições do meio podem ser influenciadas por mecanismos de controle de crescimento, devido a processos metabólicos complexos governados pelo balanço de hormônios da planta (RIDGE e OSBORNE, 1970). Deficiência de água, salinidade, anaerobiose e efeitos osmóticos foram considerados fatores que influenciam o crescimento da planta diretamente, com efeito no balanço hormonal (VAADIA e ITAI, 1969).

A região apical da raiz, sujeita a deformações devido a restrições mecânicas, é o maior sítio de síntese de substâncias que controlam o seu crescimento. Além disso, quando as raízes crescem contra pressões aplicadas externamente, que são subsequentemente aliviadas, sua taxa de extensão somente retorna àquela de uma raiz desimpedida dois ou três dias após o alívio da pressão. Este atraso é compatível com o princípio de que a resposta à restrição mecânica é iniciada dentro dos tecidos do meristema apical. Quando os eixos das raízes são forçados a curvar, iniciação de raízes laterais desenvolve-se do lado convexo, sugerindo que restrição mecânica afeta o processo regulatório de crescimento (RUSSEL e GOSS, 1974). Reduções na taxa de crescimento radicular, devido a restrições relativamente baixas, não podem ser explicadas em termos físicos. Algum mecanismo fisiológico pode estar envolvido (GOSS e RUSSEL, 1980).

O envolvimento do etileno nas respostas de raízes ao impedimento mecânico foi recentemente questionado (MOSS et al.,

1988, citados por BENGOUGH e MULLINS, 1990). Eles verificaram um aumento de duas a duas vezes e meia na taxa de evolução do etileno devido ao impedimento mecânico das raízes. O suprimento deste composto às raízes não impedidas simulou o efeito do impedimento. Porém, a utilização de dois inibidores da produção de etileno suprimiu inteiramente o aumento da taxa de evolução, mas não modificou o crescimento das raízes. Eles também sugeriram que o aumento desta taxa nas raízes impedidas pode não ser resultado de um efeito direto da restrição mecânica, mas do curvamento físico da raiz expandindo-se radialmente no meio de crescimento. O papel do etileno deve ser discutido à luz de alguns experimentos recentes e o seu envolvimento na resposta de raízes ao impedimento mecânico deve ser mais claramente estabelecido (BENGOUGH e MULLINS, 1990).

2.3.2. Disponibilidade de água no solo

O suprimento de água e ar para as raízes das plantas acontece no solo ou através dele. A quantidade máxima de água que o solo pode armazenar por alguns dias é conhecida como "capacidade de campo". Infelizmente, este valor é bastante variável, e por motivos práticos, a capacidade de campo corresponde a um potencial mátrico de água ao redor de -10 KPa, embora sejam utilizados valores na faixa de -6 a -33 KPa. A maioria das culturas agrícolas podem extrair água do solo até potenciais mátricos ao redor de -1500 KPa (DEXTER, 1988). O conteúdo volumétrico de água entre a

capacidade de campo (-10 KPa) e o ponto de murcha permanente (-1500 KPa) pode ser fortemente afetado pelo cultivo e tráfego. Um solo bastante desagregado e compactado pode ter o seu conteúdo volumétrico de água aumentado consideravelmente a -10 KPa. Até um certo grau de compactação, o conteúdo volumétrico de água a -10 KPa e em menor extensão a -1500 KPa, aumenta linearmente com a compactação (KUIPERS, 1984, citado por BOONE, 1988). Conseqüentemente, a quantidade de água disponível aumenta até um certo ponto e em seguida diminui pela redução da porosidade total (BOONE, 1988).

A capacidade de armazenamento e habilidade do solo em transmitir água para a superfície de raízes, em respostas aos gradientes de potencial, são requisitos para o suprimento de água (DEXTER, 1988). A condutividade hidráulica mínima do solo para o suprimento de água não restringir o desenvolvimento de plantas deve ser ao redor de 10^{-4} a 10^{-5} mm/dia (TAYLOR e KLEPPER, 1975; REICOSKY e RITCHIE, 1976). A condutividade hidráulica saturada (K_s) depende em grande parte do número, da continuidade e do raio dos poros grandes ou da largura da fenda. Por isso, a condutividade hidráulica diminui significativamente com a compactação (BOONE, 1988).

A drenagem pode ocorrer antes da matriz do solo estar saturada, através de fluxo de passagem, desde que poros grandes verticais e contínuos (por exemplo canais de minhocas) e fendas verticais, acessem à superfície. O plantio direto, em princípio favorece o desenvolvimento de um sistema permanente de bioporos

(CHAMBLIM, 1985) e nos ciclos de expansão e contração do solo, um sistema contínuo de fendas. Conseqüentemente, a água pode ser transportada até a profundidade máxima de enraizamento (BOONE, 1988).

O potencial de absorção de água pelas raízes é uma função das propriedades do solo e das raízes, tais como, difusividade da água no solo, área de contato entre a matriz do solo e a superfície radicular, profundidade de enraizamento, densidade e idade das raízes. A profundidade de enraizamento, onde 80 a 95% de todas as raízes são encontradas, é de extrema importância na determinação da quantidade de água disponível para a planta. A densidade radicular e o contato solo-raiz modificam a taxa de absorção em caminhos opostos, pois a compactação diminui a densidade radicular mas aumenta o contato solo-raiz (BOONE, 1988).

TAYLOR et al. (1964), em experimento com algodão, observaram o comportamento das raízes ao penetrarem camadas de um solo franco-arenoso. Eles verificaram que as raízes penetraram camadas com densidades de 1,70 até 1,76 g/cm³ quando o potencial de água no solo foi maior do que -0,01 MPa. Quando os potenciais foram menores do que -0,03 e -0,04 MPa, as raízes somente penetraram nas fendas do solo. Ao crescerem em solo que estava úmido, e posteriormente teve os seus potenciais diminuídos para -0,05 MPa ou menos, houve parada da expansão radial e estrangulamento das raízes, com aumento anormal do diâmetro destas acima da zona compactada. Em outro experimento com algodão, em rizotron, um compartimento foi deixado secar e o outro foi irrigado

frequentemente. Após 25 dias, no compartimento que foi deixado secar, as raízes morreram na superfície e aumentaram consideravelmente em profundidade. No compartimento irrigado, as mudanças verificadas no enraizamento foram menores, com distribuição mais homogênea das raízes (KLEPPER et al., 1973).

Segundo TAYLOR (1981), existem essencialmente três formas de atuar sobre o sistema radicular para aumentar a eficiência do uso de água. Na primeira, o suprimento anual de água pode ser aumentado pela manipulação do padrão de enraizamento, através de modificação do perfil de solo, deixando-o mais favorável como meio de enraizamento, e pela seleção de plantas que toleram condições específicas limitantes da extensão radicular. Na segunda, os sistemas de manejo podem ser planejados para racionalizar o suprimento de água disponível anualmente. Esta estratégia frequentemente aumenta o rendimento de culturas que, normalmente extraem o suprimento anual de água antes da maturidade. Na terceira, se a falta de algum nutriente limita o rendimento da cultura, o uso de fertilizantes aumentará a eficiência do uso de água, pelo aumento da concentração do íon limitante na superfície da raiz ou pelo aumento da superfície de raiz na camada de solo que contém a maior concentração de nutrientes.

2.3.3. Aeração do solo

As plantas necessitam de oxigênio em quantidades suficientes para suprir o seu consumo durante sua atividade metabólica. Assim,

poros contínuos, drenados e pouco tortuosos são necessários no solo (BALL, 1981). A necessidade mínima para o desenvolvimento de plantas é de pelo menos 10% do volume de solo com poros cheios de ar na capacidade de campo e de que pelo menos 10% do gás nestes poros seja oxigênio (VOMOCIL e FLOKKER, 1960; GRABLE e SIEMER, 1968; NYE e TINKER, 1977; DEXTER, 1988). O suprimento de oxigênio para as raízes depende de fatores muito complexos, incluindo continuidade, tortuosidade, tamanho dos poros e espaçamento dos poros cheios de ar (DEXTER, 1988).

Devido à distribuição heterogênea de raízes, à biomassa do solo, aos poros cheios de ar e pelo fato de que a difusão de oxigênio na água é cerca de 10^4 vezes menor do que no ar, a aeração do solo tem uma alta heterogeneidade espacial e uma grande variação temporal, (CURRIE, 1961; STOLZY e FLUEHLER, citados por BOONE, 1988). Em se tratando de movimento de ar no solo, é conveniente considerar o solo como uma cadeia de canais ou poros cheios de ar e água. As proporções dos diferentes tamanhos de partículas e/ou agregados, determinam a distribuição do espaço poroso no solo. Isto influencia o potencial ou a força necessária para remover a água dos poros, permitindo que o ar entre (CANNEL e JACKSON, 1981).

CANNEL e JACKSON (1981), revisando vários autores, agruparam os poros do solo em função da sua variação em tamanho, em três categorias. Na primeira, de grandes poros, que estão cheios de ar na capacidade de campo, em potenciais de água de - 5 a - 10 KPa e com diâmetros menores do que 60 a 30 μm . Por exemplo, em trigo e

cevada, o diâmetro dos eixos da raiz principal são de 300 a 700 μm , e das laterais secundárias são de 100 a 300 μm . Como as raízes normalmente não entram em poros rígidos menores do que o seu próprio diâmetro (WIERSUM, 1957), isto quer dizer que os poros penetrados por elas estão freqüentemente cheios com ar, quando o solo está na capacidade de campo ou abaixo dela. Na segunda categoria de poros, estão aqueles com diâmetros suficientes para armazenar água, permitindo que esta seja retirada pelas raízes até um potencial de -1500 KPa. Isto corresponde a diâmetros de cerca de 60 a 0,2 μm . Caso o solo drene livremente, e não contraia durante o secamento, estes poros estarão cheios com ar durante um certo tempo, dependendo das chuvas e da extensão na qual a água seja extraída pelas raízes. Nos solos argilosos, onde ocorre extensiva contração quando a água é retirada, os poros sofrerão colapso e a entrada de ar será muito menor (CANNEL e JACKSON, 1981). Na terceira categoria, os poros são pequenos a ponto de não permitirem a remoção de água pelas plantas. Devido à ausência de uma terminologia geralmente aceita para qualificar a função do poro, os autores utilizaram a proposta feita por GREENLAND (1977) "poros de transmissão, armazenagem e residuais", respectivamente. De acordo com o tipo de solo, a proporção destas três categorias pode variar amplamente. A continuidade dos poros pode afetar grandemente a taxa de difusão de gases e a drenagem.

Baixa concentração de gás carbônico na superfície da raiz pode inibir sua atividade metabólica com conseqüências no seu crescimento (GREENWOOD, 1969). A taxa de absorção de oxigênio

pelas raízes de mostarda foi afetada em valores de pressão parcial de oxigênio tão baixas quanto 0,05 atm e em pressões de 0,01 atm a absorção cessou. Este resultado foi confirmado pela medida do efeito da pressão parcial de oxigênio nas taxas de respiração de raízes separadas da planta. A taxa de absorção de oxigênio foi 71% inferior quando a pressão parcial de oxigênio foi de 0,0095 atm. Isto sustenta a hipótese de que a atividade metabólica de raízes somente é afetada por concentrações de oxigênio muito baixas. CANNON (1925), citado por GREENWOOD (1969), relatou que o crescimento radicular de oito espécies foi levemente impedido pelo abaixamento da pressão parcial de oxigênio para 0,02 atm, mesmo quando a taxa de suprimento de oxigênio foi mantida. HUCK (1970) verificou reduções na taxa de crescimento das raízes de algodão e de soja de 50 e 10% do valor original quando a pressão parcial de oxigênio foi reduzida para 0,03 e 0,01 atm, respectivamente.

A saturação de água pode reduzir o suprimento de oxigênio para as raízes e organismos do solo em dois ou três dias num solo em pousio, e mais rapidamente quando as plantas estiverem presentes. Assim, para um mesmo clima, os solos argilosos são freqüentemente mais propensos a se tornarem deficientes em oxigênio do que os arenosos (CANNEL e JACKSON, 1981). À medida que um solo vai umedecendo ou ficando compactado, aumenta o número e o volume de lugares que não são supridos ou são inadequadamente supridos com oxigênio (CURRIE, 1984). Tanto o preparo de solo como a compactação tem efeito direto na porosidade ocupada com ar e no conteúdo de água. Por essa razão, o período durante o qual o solo

fica encharcado até que a concentração de oxigênio alcance um valor crítico, ou, o oxigênio seja completamente exaurido, diminui rapidamente com compactação pesada (BOONE, 1988).

Num solo argiloso úmido com o suprimento de ar suficiente, mesmo que os poros maiores possam ser destruídos pela compactação, este será plástico o suficiente para que as raízes possam penetrá-lo (MEREDITH e PATRICK, 1961). Compactação severa de um solo saturado aumenta o seu grau de deformação o qual reduz fortemente o coeficiente de difusão de gás (BOONE, 1988). Em solos que não expandem ou contraem, a drenagem da água ou sua extração pelas raízes causa um aumento na porosidade ocupada com ar porque o volume total de poros é constante. Por outro lado, nos solos que expandem ou contraem, a porosidade ocupada com ar nos agregados que estão entre as fendas que contraem pode permanecer inalterada mesmo que haja remoção de água. À medida que um solo seca e sofre contração, os vazios formados pelos planos de fraqueza são ocupados com ar, mas os grandes agregados formados podem ainda permanecer anaeróbicos. Por esta razão, nestes solos, somente uma pequena proporção do volume total do solo pode ser explorado pelas raízes (DEXTER, 1988). De JONG et al. (1983), ao contrário, consideram os vazios provenientes da contração do solo bastante efetivos no melhoramento da difusão de gás. Num solo sob plantio direto por vários anos, o coeficiente de difusão de gás pode ser ligeiramente maior do que num solo cultivado regularmente, considerando ambos os solos com o mesmo conteúdo de ar. Porém, a porosidade ocupada com ar no solo sob plantio direto na capacidade

de campo é menor e por essa razão a difusão de gás é 2 a 6 vezes menor do que no solo cultivado (BOONE et al., 1984).

Variações naturais nas propriedades físicas do solo podem ser modificadas pelas práticas de manejo do solo. O cultivo tem sido considerado importante para a criação de solo bem aerado, porém operações inadequadas no campo com equipamentos pesados podem resultar num ambiente radicular impróprio às culturas. A compactação de um solo, frequentemente, causa diminuição da proporção de poros de transmissão e da sua continuidade, podendo restringir o crescimento radicular. A compactação decorrente das rodas dos implementos pode chegar a 30 cm ou mais, aumentando a heterogeneidade da porosidade em áreas trafegadas quando comparada com áreas não trafegadas (CANNEL e JACKSON, 1981).

HAMBLIN (1985) discutiu os diferentes efeitos do preparo do solo sobre a distribuição do tamanho de poros e o potencial mátrico do solo. Estudos comparando plantio direto com convencional, mostraram redução no volume dos poros de aeração no plantio direto na camada de 0-20 cm, e um volume equivalente para os dois tratamentos no subsolo. Outros estudos mostraram aumento da comunicação da porosidade na superfície dos solos sob plantio direto através do desenvolvimento de canais de minhocas e outros poros da fauna do solo. A visão da autora é de que estas diferenças são decorrentes do fato de comparar-se resultados de pesquisas realizadas sob condições variadas de clima e de solo. Os resultados são diretamente dependentes do tempo após a aplicação do tratamento e do período de tempo em que as avaliações são

feitas.

2.4. FATORES QUÍMICOS DE SOLO E O DESENVOLVIMENTO RADICULAR

O termo disponibilidade de nutrientes é vago e mal definido, mas tem sido aceito para significar a facilidade com que as plantas são capazes de obter um nutriente. Por exemplo, íons na solução do solo são realmente disponíveis, mas a quantidade total é baixa. Conseqüentemente, a contínua absorção de um nutriente da solução do solo depende da taxa em que a sua concentração pode ser restabelecida pelo armazém localizado na fase sólida. Para descrever o estado dos nutrientes de um solo é necessário caracterizar o relacionamento entre o potencial químico ou o nível de energia livre dos nutrientes na solução do solo (fator intensidade) e a quantidade presente na fase sólida (fator quantidade). A habilidade do sistema para reabastecer a solução do solo é medida pelo fator capacidade, que é a razão da mudança no fator quantidade para a mudança unitária no fator intensidade (SUMNER e BOSWELL, 1981).

Quando o fluxo de massa, que é o processo onde os íons são arrastados na água e movem-se em direção e para dentro das raízes como resultado da transpiração não é capaz de suprir a demanda, o crescimento de uma raiz, dentro de um volume de solo não esgotado, aumentará a taxa de suprimento de nutrientes. A difusão é o processo pelo qual a absorção de um nutriente pela raiz é mais rápida do que o suprimento da superfície radicular por fluxo de

massa. Um aumento do gradiente de concentração causa a difusão dos nutrientes de uma região de alta para uma de baixa concentração (SUMNER e BOSWELL, 1981).

O tamanho e a morfologia do sistema radicular podem ter um profundo efeito na extração de nutrientes do solo. As raízes longas e finas têm uma superfície maior do que as raízes curtas e espessas e, desta forma, pode-se esperar que elas explorem o mesmo volume de solo mais efetivamente, pela redução do caminho médio de difusão (SUMNER e BOSWELL, 1981). Em muitos solos, altamente ácidos, a acidez do subsolo limita o rendimento de culturas, mesmo quando a camada arada é adequadamente corrigida. A proliferação de raízes nesses horizontes pode ser severamente diminuída pela toxidez de alumínio e, conseqüentemente, a água armazenada no subsolo não fica disponível às culturas (PEARSON, 1966; RITCHEY et al., 1982; HAYNES, 1984; SOUZA e RITCHEY, 1986).

O pH do solo é a medida diagnóstica mais universalmente empregada para predizer se um solo deve ser corrigido. Não há um padrão crítico de pH, pois, este varia de solo para solo e com as culturas. Como o alumínio é, freqüentemente, o cátion fitotóxico predominante em solos ácidos, um índice de sua concentração é geralmente usado como indicação da necessidade de calagem (HAYNES, 1984). Nas raízes, o excesso de alumínio interfere na divisão celular causando danos, o que reduz a elongação do eixo principal, torna-as espessas, de coloração castanha, quebradiças e às vezes com manchas necróticas e inibe o crescimento das raízes. Assim, o sistema radicular não apresenta raízes finas, é reduzido em

tamanho e de aparência coralóide (PEARSON, 1966; FOY, 1974; KESER et al., 1975; FOY, 1984; FURLANI, 1989; MALAVOLTA et al., 1989). Raízes sob o efeito do alumínio podem ser ineficientes na absorção de água e nutrientes (CHAYNES, 1984).

2.5. MODIFICAÇÕES DO PERFIL E DA ZONA RADICULAR

Qualquer operação de cultivo que altere qualquer parte do perfil de solo pode ser considerada como uma forma de modificação do perfil (BURNETT, 1969, citado por ECK e UNGER, 1985). Porém, modificação do perfil geralmente significa alguma forma de preparo do solo, com ou sem melhoramento químico ou físico a profundidades maiores do que as normalmente atingidas (UNGER, 1979). O objetivo geral da modificação do perfil é aumentar a produção das culturas, principalmente através da criação de zonas mais favoráveis ao crescimento, à proliferação e à atividade radicular (ECK e UNGER, 1985). A disponibilidade de nutrientes em profundidade é afetada pelo grau de inversão do solo, através do preparo, enquanto que o grau de mistura afeta a variabilidade horizontal na mesma profundidade. Intensa mistura de fertilizantes e resíduos de culturas aumenta o número de locais no solo com maior disponibilidade de nutrientes. A decomposição de raízes e outros materiais orgânicos frescos aumentará o número de locais facilmente acessíveis pelas raízes no sentido mecânico (BOONE, 1988).

A compactação do solo aumenta a quantidade de partículas por

volume e, em consequência, a área da seção transversal para a difusão. Também aumenta o conteúdo volumétrico de água e, assim, o fluxo de massa de íons, e por último, aumenta o contato entre a raiz e o complexo solo-água. A compactação severa, porém, diminui a taxa de expansão do sistema radicular e, desta forma, aumenta os riscos de lixiviação de nutrientes. Quando a profundidade máxima de enraizamento é diminuída, um menor volume de solo é explorado e menos água e nutrientes são supridos pela ação de capilaridade em camadas profundas do solo (BOONE, 1988).

Os efeitos da fertilização e da adição de calcário no subsolo sobre o desenvolvimento radicular e o rendimento de culturas são bastante conflitantes na literatura. ENGELBERT e TRUOG (1956) verificaram aumento na profundidade de penetração das raízes de alfafa devido à profundidade de cultivo e à adição de calcário e fertilizantes num solo franco-siltoso com subsolo altamente ácido e compacto. ROBERTSON et al. (1957) trabalhando em condições de solo semelhantes, encontraram respostas positiva de milho à subsolagem e à colocação de fertilizantes. PATRICK et al. (1959) obtiveram resultados semelhantes nos rendimentos de algodão e de milho. CARVALHO et al. (1987), trabalhando com milho em Latossolo Vermelho-Escuro álico, verificaram que através da adição de gesso houve maior aprofundamento do sistema radicular. À medida que foram aumentadas as doses de gesso, aumentou o volume de solo explorado, o que permitiu a retirada de água pelas raízes em camadas mais profundas. KAWASAKI et al. (1980) verificaram efeitos positivos da aplicação profunda de calcário e de fósforo, em

Latossolo Vermelho-Amarelo do cerrado brasileiro com níveis tóxicos de alumínio e deficientes em fósforo, no desenvolvimento radicular de soja.

Por outro lado, HOBBS et al. (1961), trabalhando com solos de diferentes texturas, concluíram que raramente o rendimento das culturas foi aumentado pela profundidade de preparo de solo. A colocação de fertilizantes em profundidade na maioria dos casos não promoveu resultados superiores à aplicação em superfície. LARSON et al. (1960) verificaram resultados semelhantes para milho. JAMISON e THORNTON (1960) concluíram que fertilizando adequadamente a superfície do solo, os aumentos da profundidade de fertilização em relação aos aumentos nos rendimentos das culturas são pequenos e de valor questionável.

As operações de modificação de perfil que melhoram a condutividade do solo à água e permitem o aumento da proliferação de raízes propiciam aumento do suprimento e da utilização de nutrientes devido às maiores possibilidades para o fluxo de massa, a difusão e o crescimento radicular (SUMNER e BOSWELL, 1981). Porém, após a subsolagem em solos ácidos, as raízes que penetram no subsolo ácido podem encontrar concentrações de alumínio que são impeditivas ao seu crescimento. RIOS e PEARSON (1964) encontraram concentrações de alumínio solúvel tão baixas quanto 1 ppm impedindo o crescimento de plântulas de algodão, e concentrações de 0,5 ppm reduzindo grandemente o desenvolvimento das raízes. HOWARD e ADAMS (1965) sugeriram que o pobre enraizamento em subsolo ácido geralmente não é resultado da

deficiência de cálcio. Eles mostraram que o crescimento das raízes primárias de algodão não foi afetado pelo pH da solução do solo por si próprio dentro da faixa de pH de 4,3 a 6,5. Os resultados encontrados por SOILEAU et al. (1969) foram semelhantes. Eles encontraram que reduções nos rendimentos de algodão foram acompanhadas por concentrações de alumínio acima de 0,2 e 0,02% nas raízes e na parte aérea da planta, respectivamente.

O crescimento em profundidade, após a subsolagem, tem sido, freqüentemente, relacionado ao teor de umidade e às modificações físicas. Camadas compactadas, podem ser decorrentes do tráfego de implementos, ou podem ocorrer naturalmente, dificultando a infiltração de água e a penetração de raízes. Na sua maioria elas ocorrem em solos que não expandem e não contraem após os ciclos de umedecimento e secagem. Quando a condição for severa o suficiente para restringir o crescimento de plantas, espera-se resultados positivos após a destruição destas camadas (ECK e UNGER, 1985). ENGELBERT e TRUOG (1956); ROBERTSON et al. (1957) verificaram que a resposta à subsolagem e à adição de fertilizantes foi relacionada à presença de subsolo compactado, à fertilidade do subsolo e ao tempo e à duração do período de déficit hídrico. Outros experimentos mostraram que o aumento do desenvolvimento radicular no subsolo e nos rendimentos pode ser esperado em decorrência da colocação de fertilizantes e do aumento da profundidade de preparo do solo, particularmente quando ocorrem períodos de déficit hídrico, devido à maior resistência das culturas aos períodos de seca (PATRICK et al., 1959). BRILL et al.

(1965), ao mensurarem a densidade do solo, a porosidade e a infiltração de água, encontraram que a subsolagem melhorou as condições físicas do solo abaixo da profundidade de aração.

Freqüentemente, as operações de modificação em profundidade no perfil promovem um aumento da profundidade de enraizamento e do movimento de água, melhoram a drenagem e a aeração e podem reduzir o escoamento superficial e a erosão (ECK e DAVIS, 1971; RASMUSSEN et al., 1972). REICOSKY (1983), citado por ECK e UNGER (1985), resumiu algumas pesquisas sobre preparo de solo e subsolagem na região das planícies costeiras do Atlântico dos Estados Unidos. A maioria dos solos da região são arenosos, com baixo teor de matéria orgânica, têm altas densidades e baixas capacidades de armazenagem de água. Nestes solos, devido às altas densidades, o crescimento radicular é inibido, especialmente quando eles tornam-se secos. As plantas enfrentam déficit hídrico dentro de 3 a 7 dias após uma chuva, e para a máxima produção da cultura, a irrigação é freqüentemente necessária. Todos os resultados positivos obtidos foram provenientes da destruição de camadas que estavam compactadas o suficiente para intervirem no desenvolvimento das raízes, e continham material subjacente favorável ao crescimento radicular. Em alguns subsolos ácidos, com níveis tóxicos de alumínio, somente houve resposta à destruição destas camadas quando calcário foi adicionado. CAMPBELL et al. (1974) obtiveram respostas da aração profunda em solos que continham camadas com alta resistência ocorrendo naturalmente ou em decorrência do tráfego. ROBERTSON et al. (1976), citados por

ECK e UNGER (1985), resumiram estudos sobre modificação do perfil realizados na Flórida e declararam que, nos solos onde se desenvolveram camadas densas provenientes do cultivo, retornos favoráveis podem ser esperados pela sua destruição. ROBERTSON et al. (1977), citados por ECK e UNGER (1985) declararam que a profundidade de cultivo teve pequeno efeito no rendimento das culturas, exceto nos solos que tinham problemas específicos. A profundidade de preparo do solo aumentou os rendimentos das culturas quando as zonas compactadas produzidas artificialmente estavam logo abaixo da camada arada. Houve menor efeito nos solos compactados naturalmente, possivelmente porque as zonas compactadas não foram completamente penetradas pelos implementos de preparo.

CASSEL (1980) verificou os efeitos da profundidade de aração e da incorporação de calcário e de fósforo sobre as propriedades físicas e químicas de um solo franco-arenoso e de uma areia franca, após 15 anos. Ele encontrou que a resistência do solo aumentou e a taxa de infiltração diminuiu com o aumento da profundidade de aração, o que criou condições desfavoráveis ao crescimento radicular. A incorporação de fósforo e de calcário aumentou os níveis de fósforo, de magnésio e de cálcio nas camadas de 18 - 38 cm e 38 - 51 cm, deixando as condições químicas mais favoráveis para o enraizamento. A condutividade saturada aumentou nas camadas de 0-18 cm e 18 - 38 cm nas pressões de água mais altas, devido aos altos conteúdos volumétricos de água, provenientes das altas densidades do solo e do material fino da

matriz. KASPAR et al. (1991), examinaram a distribuição do sistema radicular de milho, através de sistemas de cultivo, do tráfego e da adição de fertilizantes, em solo franco-argilo-siltoso. Eles verificaram que na camada de 0-15 cm, nas entre-linhas trafegadas devido à compactação, o comprimento e a massa de raízes foi menor do que a metade das entre-linhas não trafegadas. O comprimento e a massa de raízes aumentou nas linhas e nas entre-linhas devido à adição de fertilizantes. Os sistemas de cultivo somente influenciaram o crescimento radicular nas entre-linhas não trafegadas. GERIK et al. (1987) analisaram o efeito nas propriedades físicas do solo das linhas de tráfego controlado e no crescimento radicular da seqüência de rotação sorgo-algodão-trigo, nos sistemas de plantio convencional e direto. Eles verificaram que a resistência e a densidade do solo foram maiores nas linhas trafegadas do plantio direto e que a compactação do solo ficou confinada na camada de 0-15 cm, sendo que a densidade radicular foi menor nesta camada. Nas profundidades maiores do que 30 cm, a densidade radicular não foi afetada pelas espécies, cultivo ou tráfego.

Em outras pesquisas sobre a profundidade de cultivo e modificações do perfil, as conclusões têm sido baseadas nos padrões de exaurimento de água no solo. HOBBS et al. (1961) encontraram que a profundidade de cultivo diminuiu a densidade do solo e aumentou a permeabilidade nas camadas densas. ECK e TAYLOR (1969) mostraram que as modificações do perfil aumentaram a taxa de absorção e a profundidade de umedecimento do solo. MUSICK e

DUSEK (1975) determinaram as taxas de infiltração, de retenção e de esgotamento de água em solo franco-argiloso e verificaram que a profundidade de preparo do solo teve pequeno efeito no esgotamento da água do solo durante os maiores ciclos de secagem. O suprimento de água para as plantas somente foi maior quando o conteúdo de água foi maior no início dos ciclos de secagem. UNGER (1970), trabalhando com solo franco-argilo-siltoso, verificou que a profundidade de preparo não aumentou a capacidade de armazenamento de água do solo, mas aumentou a taxa de infiltração.

A literatura sobre camadas compactadas provenientes de implementos de cultivo indica que num perfil de solo favorável ao crescimento radicular, a destruição destas camadas permite mais completa exploração radicular. Quando ocorrem períodos secos, o aumento do suprimento de água decorrente da maior exploração do solo pelo sistema radicular pode aumentar os rendimentos de culturas. O preparo de solo profundo destes solos somente aumenta os rendimentos quando problemas específicos são solucionados (UNGER et al., 1981; ECK e UNGER, 1985).

2.6. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO SISTEMA RADICULAR

As investigações do sistema radicular são feitas através da avaliação de características das raízes, tais como, a massa, o comprimento e a área superficial, no tempo e no espaço, e de fatores do ambiente que influenciam o desenvolvimento radicular, como por exemplo, a densidade do solo, a resistência à penetração,

a água, o ar e os nutrientes (BÖHM, 1979).

Segundo SCHUURMAN e GOEDEWAAGEN (1971) ; BÖHM (1979), os principais métodos de estudo de raízes são: método da escavação; método do monolito; método do trado; método da parede de perfil; método da parede de vidro e método do elemento marcado.

No método da escavação, o mais usado em pesquisa ecológica (BÖHM, 1979), o sistema radicular é todo exposto através de escavação cuidadosa. Após este procedimento, as raízes podem ser desenhadas ou fotografadas, conforme for o objetivo do estudo. É um método trabalhoso e demorado.

No método do monolito, retiram-se monolitos e a separação das raízes do solo é feita por lavagem. Em seguida são feitas as determinações quantitativas que podem ser complementadas com representações pictóricas.

No método do trado, são retiradas amostras volumétricas de solo e de raiz, em diferentes distâncias e profundidades. A coleta de amostras pode ser feita por trado manual ou por máquina de amostragem com sistema hidráulico, e a separação das raízes do solo por lavagem. Em seguida determina-se a massa, o comprimento, o raio e a superfície radicular.

O método da parede de perfil é considerado o mais simples dos métodos quantitativos. Neste, abre-se uma trincheira e em uma face vertical remove-se uma camada de aproximadamente 5,0 mm de espessura de solo para a exposição das raízes. Isto pode ser feito através de ferramentas manuais, ou por jatos de água ou ar. Após, o comprimento de raízes expostas é determinado.

No método da parede de vidro, o desenvolvimento do sistema radicular é acompanhado através de janelas de vidro colocadas junto ao perfil de solo. O rizotron é a aplicação deste método de forma mais elaborada, pois quase não perturba os padrões de crescimento da planta. Mais recentemente, o minirizotron tem sido utilizado, onde pequenos tubos de vidro são introduzidos no solo e as raízes ficam visíveis através de espelhos e de técnicas de iluminação. Este método foi aperfeiçoado pela utilização de microcâmaras que permitem estimar a atividade das raízes. É um método não destrutivo, mas sofisticado, o que exige envolvimento de pessoal especializado.

No método do elemento marcado, utilizam-se isótopos, como por exemplo, o ^{32}P . Neste, os elementos marcados são deixados a distâncias determinadas da planta e posteriormente verifica-se a sua presença na planta, o que indica a extensão das raízes até o isótopo. O isótopo também pode ser injetado no caule, e, posteriormente é realizada a amostragem do solo.

TARDIEU e MANICHON (1986a, b; 1987a, b, c) utilizaram o método de cartografia "in situ" para estudar o sistema radicular. O método consiste em determinar um quadriculado num plano vertical e horizontal; cortando o volume de solo enraizado e apreciando visualmente a densidade radicular nos dois planos. O método foi adotado por MANICHON (1980, citado por TARDIEU e MANICHON 1986 a), para o estudo das consequências do estado estrutural do solo sobre a penetração de raízes. Outros autores, como BÖHM et al. (1977); EHLERS et al. (1981), utilizaram o método para estimar o

comprimento total de raízes por horizonte, de onde eles deduziram a distância média entre raízes vizinhas. O método da cartografia é menos preciso do que aquele utilizado por BÖHM et al. (1977), por exemplo, para a determinação do comprimento radicular, mas por outro lado, permite um estudo da disposição espacial de raízes, a determinação "in situ" do contato solo-raízes e a fácil determinação da distância que a água deve percorrer até as raízes (TARDIEU e MANICHON, 1986 a).

A escolha do método de avaliação de raízes depende do objetivo do estudo. O método do trado é o mais adequado à retirada de amostras volumétricas de solo e de raízes entre as técnicas de amostragem (BÖHM, 1979). Conforme THOUGHTON (1981), o método do trado é mais adequado para o estudo de pastagens. DREW e SAKER (1980) determinaram o comprimento radicular por unidade de volume de solo pela contagem do número de raízes em faces horizontais de amostras, e obtiveram correlação satisfatória com o método do monolito. KÖPKE (1981) comparou quatro dos principais métodos de avaliação de raízes, o do monolito, o do trado, o do perfil e o do tubo de vidro, utilizados a campo, com relação ao tempo de trabalho gasto e à sua acurácia. A maior densidade de comprimento de raízes (cm/cm^3) foi determinada com o método do monolito, considerado desta forma como o método padrão. Este método apresentou maior exatidão. O método do perfil apresentou a relação mais favorável entre o tempo gasto e a informação obtida. Porém, como o método subestimou a medida de densidade de comprimento comparado com o método do monolito, os dados foram multiplicados

pelo fator 2,06. O método do trado, onde o cilindro de solo foi cortado e as raízes foram contadas no plano de clivagem, requereu pouco trabalho, o que permitiu um maior número de repetições a fim de avaliar diferenças entre tratamentos com significância estatística. O método do tubo permitiu acompanhar a taxa de crescimento de raízes idênticas num curto intervalo de tempo.

Segundo NOORDWIJK et al. (1985), o número de amostras que devem ser coletadas depende da precisão requerida na determinação da densidade radicular média e da variação entre amostras. Os coeficientes de variação, em amostras coletadas pelo método do trado, para a massa seca de raízes de cereais são em média 45% para 0-30 cm e 51% para 30-60 cm de profundidade, respectivamente. Para coeficientes de variação de 40%, considerados normais, são necessárias 25 amostras por tratamento para se distinguir 22% de diferenças entre duas médias, ou dez amostras para 35% de diferenças. BÖHM (1979) relatou que são necessárias pelo menos cinco amostras de raízes, coletadas pelo método do trado, para se obter resultados estatisticamente significativos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido na Estação Experimental da Cooperativa Batavo, localizada em Carambei, no Município de Ponta Grossa- PR, a 25° 20' de latitude sul e a 50° 20' de longitude, em um solo classificado como Latossolo Vermelho-Escuro distrófico, derivado de resíduos intemperizados de rochas sedimentares de natureza argilosa. O clima da região é do tipo Cfb, conforme a classificação de Koeppen (GODOY et al., 1976).

As análises granulométricas e de densidade de partículas foram determinadas através da coleta de amostras após a instalação do experimento, nos diferentes métodos de preparo de solo. Os resultados estão nas TABELAS 1 e 2, respectivamente. As análises químicas de solo foram realizadas a partir de amostras coletadas previamente (TABELA 3), e, posteriormente à implantação do experimento. Tanto as análises físicas como as químicas de solo foram feitas de acordo com metodologia descrita por EMBRAPA (1979).

3.2. TRATAMENTOS

As parcelas receberam os tratamentos descritos na TABELA 4. Em todas as parcelas foi adicionado fertilizante fosfatado Yoorin para se atingir 15 ppm de fósforo no solo. O tráfego foi

controlado em todos os tratamentos a partir da semeadura da primeira cultura, de forma que criaram-se faixas com e sem tráfego. O deslocamento do trator e da colheitadeira foi orientado através de marcos permanentes (FIGURA 1b), que indicavam o centro das parcelas. A intensidade do tráfego no experimento foi duas passadas da colheitadeira. No croqui da área experimental (FIGURA 1a) consta a disposição dos tratamentos.

TABELA 1 : RESULTADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA NOS PREPAROS DE SOLO APÓS A INSTALAÇÃO DO EXPERIMENTO.

Prof. (cm)	Areia fina	Areia grossa	Areia total	Silte	Argila
Preparo de solo a 20 cm.					
0-10	18.13 (1.0)	19.80 (1.1)	37.93 (0.6)	16.07 (1.5)	46.00 (2.0)
10-20	18.47 (0.4)	17.93 (1.7)	36.40 (2.1)	15.15 (2.7)	48.00 (2.6)
20-30	18.27 (0.1)	16.60 (1.4)	34.67 (1.2)	15.13 (0.8)	50.00 (4.0)
30-40	18.53 (1.5)	16.20 (0.7)	34.73 (1.1)	13.27 (0.8)	52.00 (0.0)
40-50	18.60 (1.2)	16.20 (2.0)	34.80 (1.6)	11.47 (0.7)	54.67 (1.1)
50-60	18.50 (1.1)	14.74 (0.2)	33.24 (0.5)	11.73 (0.8)	54.00 (2.3)
Preparo de solo a 60 cm.					
0-10	18.00 (0.8)	20.87 (2.0)	38.87 (2.3)	11.80 (1.4)	49.33 (1.1)
10-20	18.53 (2.2)	18.40 (2.1)	36.93 (0.6)	12.73 (0.6)	49.33 (1.1)
20-30	18.07 (1.7)	19.40 (0.7)	37.47 (1.8)	12.53 (1.8)	50.00 (0.0)
30-40	18.07 (0.8)	19.00 (1.4)	37.07 (1.7)	13.40 (1.7)	51.33 (0.0)
40-50	18.33 (1.5)	18.53 (1.4)	36.86 (1.8)	11.87 (1.2)	52.67 (2.3)
50-60	17.16 (1.3)	18.27 (2.6)	35.43 (2.7)	11.00 (1.2)	53.33 (2.1)

Os valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão da média.
Método utilizado : Vettori
Médias de três repetições

TABELA 2 : RESULTADOS DA DENSIDADE DE PARTICULAS (g/cm^3) NOS TRATAMENTOS DE SOLO.

Prof (cm)	Preparo a 20 cm.	Preparo a 60 cm
0-10	2.58 (0.07)	2.69 (0.07)
10-20	2.65 (0.07)	2.69 (0.06)
20-30	2.64 (0.06)	2.66 (0.01)
30-40	2.66 (0.05)	2.70 (0.04)
40-50	2.68 (0.03)	2.68 (0.08)

Os valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão da média. Médias de três repetições.

TABELA 3 : CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLO PREVIAMENTE À INSTALAÇÃO DO EXPERIMENTO

Prof. (cm)	pH CaCl ₂	Acetato meq/100cm ³ de solo					P ppm	C %
		Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺		
0-10	5.2	0.00	5.5	4.7	3.1	0.40	9.5	2.2
10-20	4.9	0.10	6.2	2.8	1.7	0.20	3.0	2.2
20-30	4.6	0.50	5.6	1.4	0.7	0.08	0.9	2.0
30-40	4.6	0.40	5.5	1.3	0.7	0.05	0.8	1.5
40-50	4.7	0.20	5.2	1.4	0.8	0.04	-	1.5
50-60	4.8	0.06	4.8	1.5	0.9	0.03	-	1.3

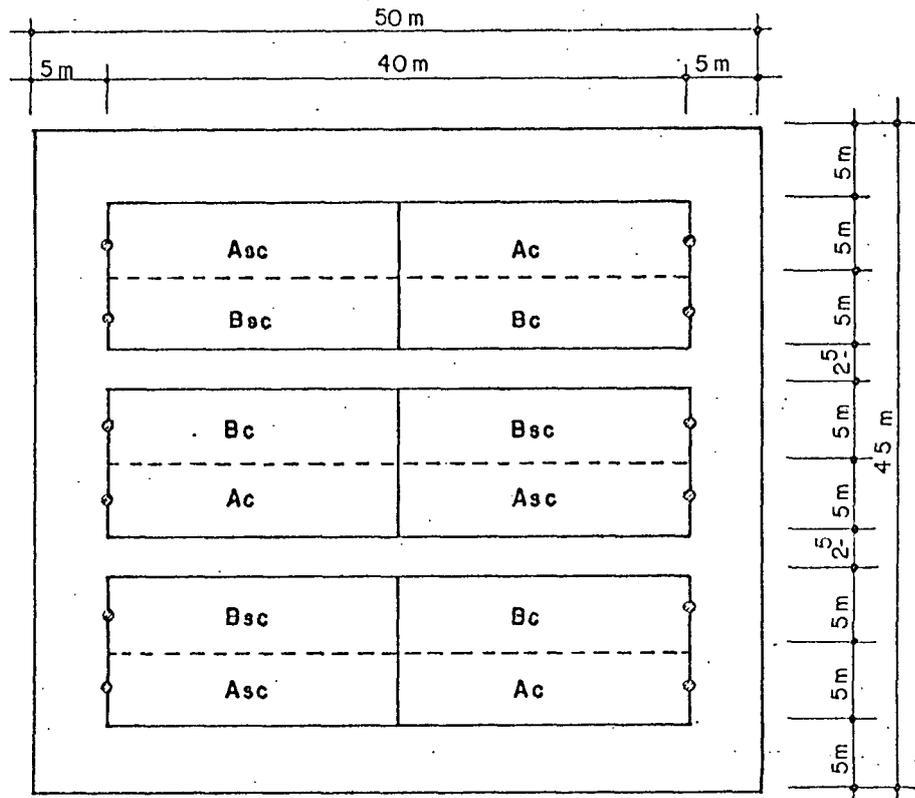
Médias de três repetições

TABELA 4: TRATAMENTOS DE PREPARO DE SOLO, DE CALAGEM E TRÁFEGO.

Preparo de solo
1. Arado de discos a 20 cm de profundidade 2. Arado rotativo a 60 cm de profundidade
Níveis de calcário
1. Sem calcário adicional 2. Com calcário para 70% de saturação do complexo de troca
Níveis de tráfego
1. Faixas permanentemente sem tráfego 2. Faixas com tráfego cumulativo do trator e da colheitadeira

3.3. SISTEMA DE CULTIVO E MANEJO

O calcário e o fertilizante fosfatado foram incorporados através do preparo primário, que foi seguido de uma gradagem leve. A partir desse momento iniciou-se o sistema de plantio direto, com a rotação de culturas apresentada na TABELA 5, que deverá ser conduzido pelo menos até 1995. No plantio de milho e de soja utilizou-se uma plantadeira de marca SEMEATO PAR 2800 e no plantio de ervilhaca e de aveia preta uma semeadeira de marca MENEGAZ. O manejo de pragas, de doenças e de plantas invasoras foi realizado através de métodos químicos convencionais. Na colheita foi utilizada uma colheitadeira de marca SLC 3200 com 3/4 da carga total, equipada com picador e distribuidor de palha.



LEGENDA

Asc : ARADO DE DISCOS A 20cm DE PROFUNDIDADE, SEM CALCÁRIO ADICIONAL.
Ac : ARADO DE DISCOS A 20cm DE PROFUNDIDADE, COM CALCÁRIO ADICIONAL.
Bsc : ARADO ROTATIVO A 60cm DE PROFUNDIDADE, SEM CALCÁRIO ADICIONAL.
Bc : ARADO ROTATIVO A 60cm DE PROFUNDIDADE, COM CALCÁRIO ADICIONAL.

FIGURA (a) CROQUI DA ÁREA EXPERIMENTAL COM A DISPOSIÇÃO DOS TRATAMENTOS

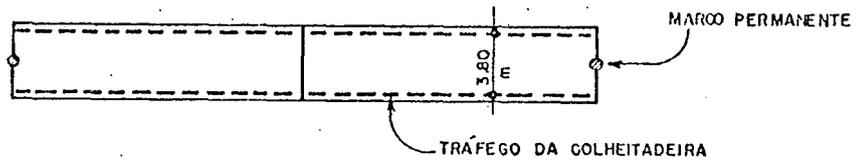


FIGURA (b) CROQUI DA DISPOSIÇÃO DO TRÁFEGO NAS PARCELAS

TABELA 5 : ROTAÇÃO DE CULTURAS DURANTE O EXPERIMENTO

	<u>Inverno</u>	<u>Verão</u>
Safra 89/90	ervilhaca	milho
Safra 90/91	aveia preta	soja

3.4. COLETA DE AMOSTRAS DE RAÍZES

Para a coleta de amostras utilizou-se o método do trado, descrito por SHURMAN e GOEDEWAAGEN (1971); BOHM (1979). O equipamento consiste em um trado de 7,0 cm de diâmetro e 10,0 cm de comprimento com um cilindro serrilhado e cortante numa das extremidades (FIGURA 2). A escolha do método foi baseada na minimização de danos às parcelas em comparação com outros possíveis métodos, pois, o presente trabalho é parte de um estudo de longo prazo (seis anos), em parcelas individuais de 5 x 20 m. Na cultura de milho foram coletadas amostras em seis pontos de amostragem e em seis profundidades (0 - 10; 10 - 20; 20 - 30; 30 - 40; 40 - 50 e 50 - 60 cm) (FIGURA 3). Para a cultura de soja, coletou-se em quatro pontos de amostragem e em quatro profundidades (0 - 10; 10 - 20; 30 - 40 e 50 - 60 cm) (FIGURA 4). O número de amostras coletadas foi de 432 e 192, respectivamente para o milho e para a soja. As coletas foram realizadas durante o período da antese.

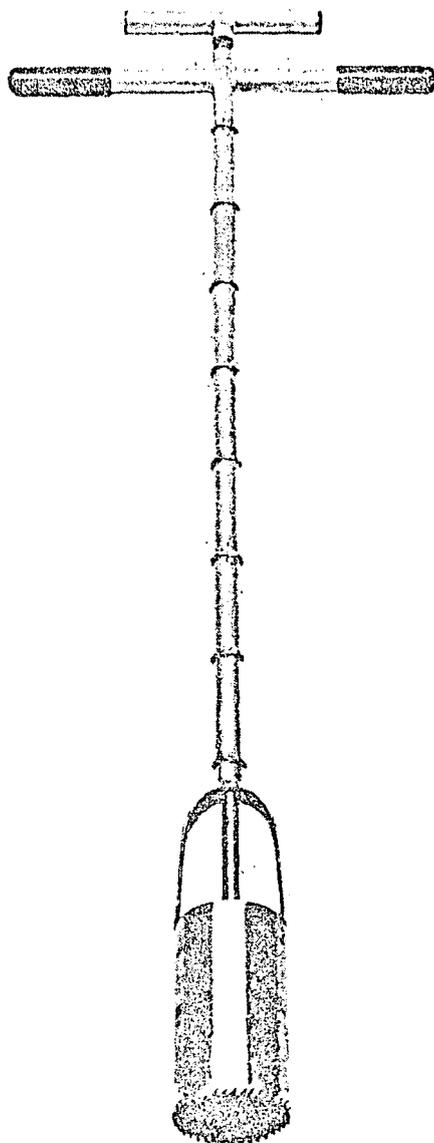


FIGURA 2 : TRADO UTILIZADO PARA A COLETA DE AMOSTRAS DE RAÍZES
(ADAPTADO DE BÖHM, 1979).

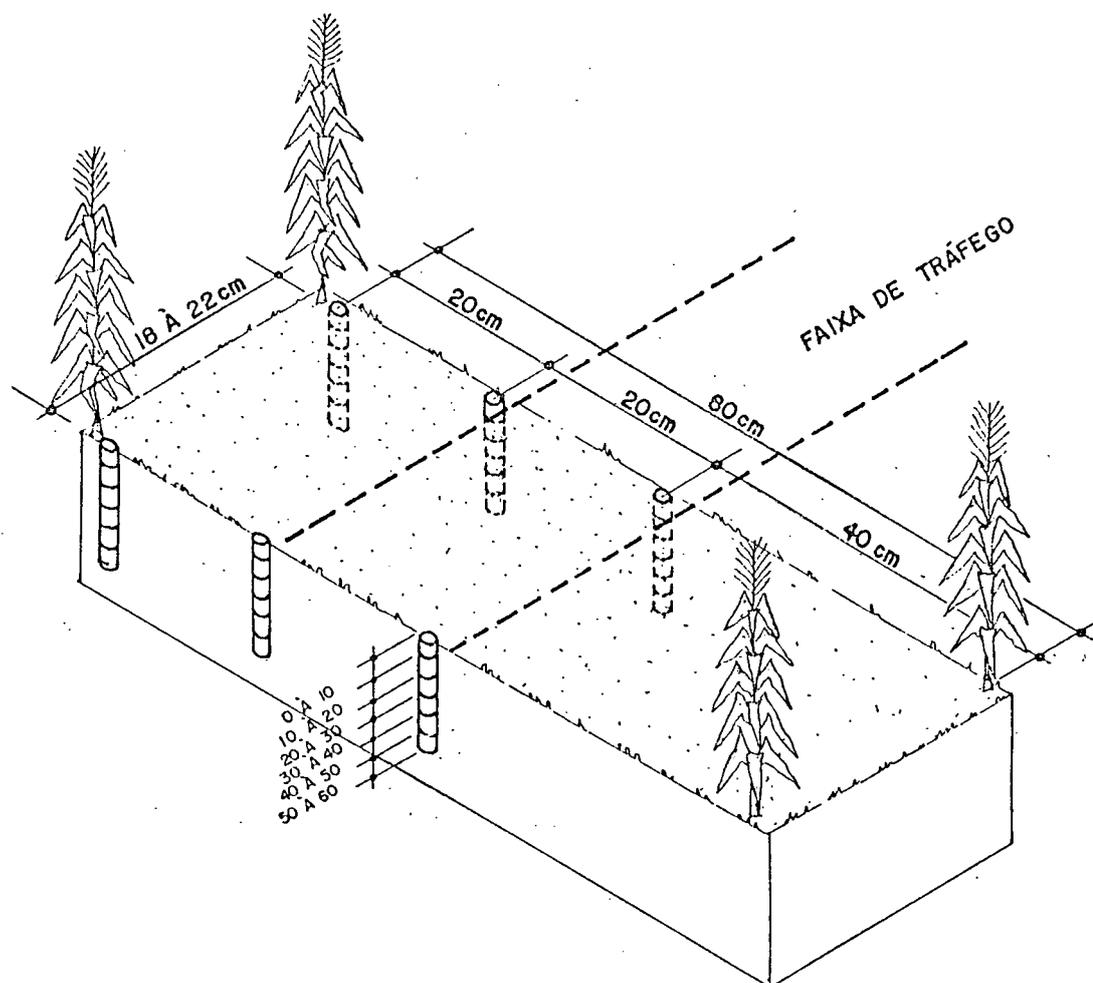


FIGURA 3) DISTÂNCIA E PROFUNDIDADE DE AMOSTRAGEM PARA A CULTURA DE MILHO.

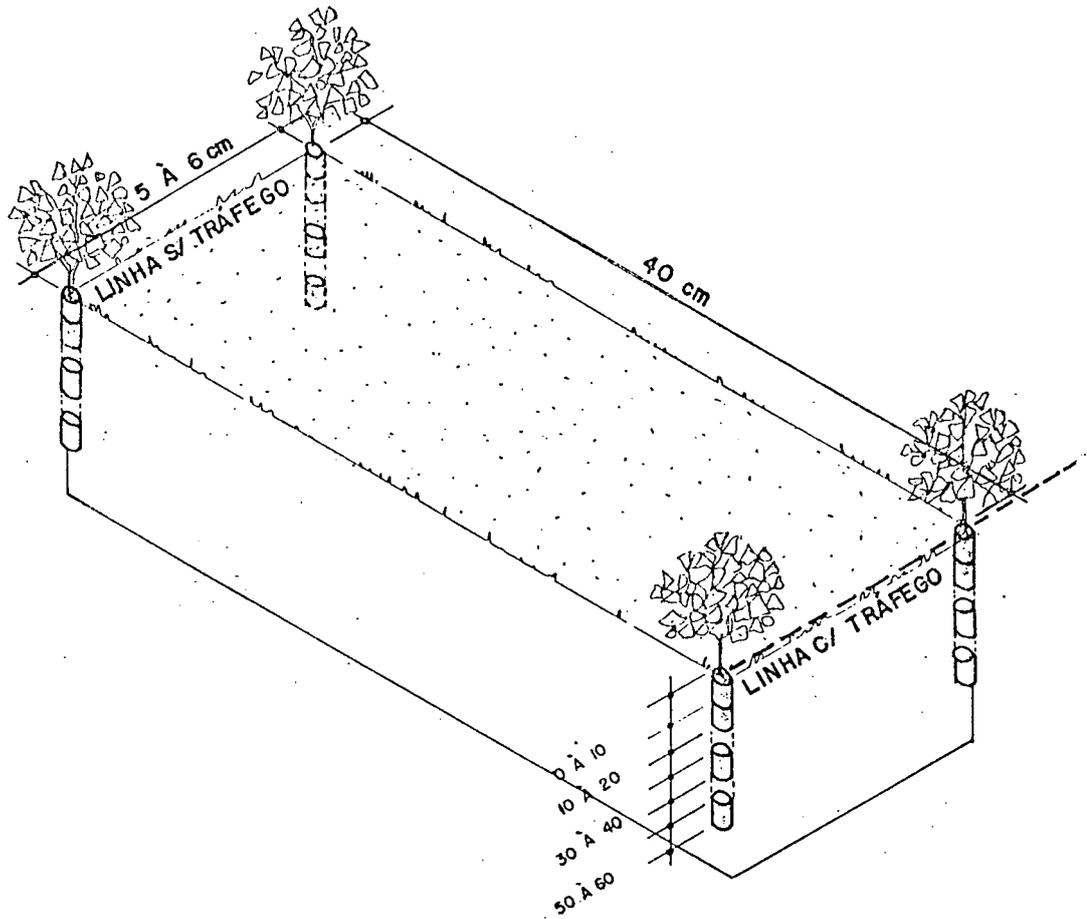


FIGURA 4) DISTÂNCIA E PROFUNDIDADE DE AMOSTRAGEM PARA A CULTURA DE SOJA.

3.4.1. Lavagem e conservação de amostras

As amostras foram deixadas em 25 ml de hidróxido de sódio 1 N diluído em 1 l de água durante 12 horas para a dispersão de argilas, e em seguida sofreram lavagem em um jogo de peneiras com malhas de 2,0; 1,0; 0,7 e 0,2 mm. A separação das raízes das culturas de outros materiais como raízes secas de outras plantas e matéria orgânica, foi realizada manualmente com pinças de ponta fina. Posteriormente, as raízes foram acondicionadas em sacos plásticos contendo solução de etanol 50% e foram armazenados a 0°C conforme BOHM (1979), até a determinação dos parâmetros radiculares. O tempo necessário para a limpeza de cada amostra variou de 40 minutos a 1 h e 30 min com duas pessoas trabalhando.

3.4.2. Determinação dos parâmetros radiculares

Determinou-se três parâmetros radiculares: densidade de massa seca, densidade de comprimento e raio médio de raízes. A densidade de massa seca foi determinada através de pesagem das raízes após secagem em estufa a 60°C durante 48 horas (BOHM, 1979); a densidade de comprimento a partir do método descrito por TENNANT (1975), que utiliza a equação:

$$C = N \cdot fc \quad (1)$$

onde

C é comprimento radicular, N o número de intersecções e fc o

fator de correção (variável de acordo com o tamanho da grade utilizada), sendo que no presente trabalho utilizou-se grade de 1 cm^2 , com o fc correspondente de 0,7857.

O raio médio foi determinado segundo SHENK e BARBER (1979), pela equação:

$$r = (mf/c.\pi)^{0,5} \quad (2)$$

onde

r é raio médio, mf a massa fresca, c o comprimento radicular e π a constante matemática igual a 3,1416.

3.5. DETERMINAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Os dados de resistência à penetração, de densidade de partículas, de densidade do solo e de porosidade de aeração foram obtidos por TORMENA (1991). O equipamento utilizado para a determinação da resistência à penetração foi um penetrômetro cônico modelo SOLOTEST S 310, com ângulo de penetração de 30° e área da base do cone de $6,33 \text{ cm}^2$. Foram também coletadas amostras para a determinação da umidade gravimétrica. As amostragens de resistência à penetração foram feitas em seis pontos por tratamento: três pontos numa linha sem tráfego e três pontos numa linha com tráfego, até a profundidade de 60 cm em incrementos de 5 cm, de acordo com BRADFORD (1986). Os valores brutos de resistência à penetração foram transformados segundo equação obtida da calibração de fábrica do penetrômetro (TORMENA, 1991).

Os resultados foram expressos através do índice de cone (IC), que estabelece uma relação entre a força necessária para penetrar o cone no solo e a área basal deste (BRADFORD, 1986). A densidade de partículas foi determinada através do uso de balão volumétrico e álcool etílico (EMBRAPA, 1979). A densidade do solo pela relação entre massa de solo seco a 105 - 110 °C e o volume da amostra (BLAKE e HAGE, 1986). A porosidade total foi obtida a partir da relação entre a densidade do solo e a densidade de partículas (DANIELSON e SUTHERLAND, 1982); a microporosidade através da umidade retida na tensão de 6 KPa; a macroporosidade ou porosidade de aeração pela diferença entre a porosidade total e a quantidade de água por unidade de volume de solo retida na tensão de 6 KPa.

3.6. DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE MATÉRIA SECA ADICIONADA AO SOLO PELO SISTEMA RADICULAR

Para o cálculo da quantidade de matéria seca (t/ha) adicionada ao solo, considerou-se como a unidade padrão de amostragem o volume de solo de 16000 cm³, obtido pela multiplicação dos valores 40 cm x 40 cm x 10 cm, que representam respectivamente, a distância de amostragem a 40 cm da planta, a distância entre duas plantas considerando-se o seu domínio de influência e a profundidade de cada camada de solo amostrada (ver FIGURA 3). Em seguida, calculou-se a média da densidade de massa seca de raízes (mg de raiz/cm³ de solo) de cada camada de solo e multiplicou-se os valores pelo volume de solo compreendido pela unidade padrão de amostragem. O próximo passo foi a transformação

dos valores em t/ha.

3.7. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os preparos de solo e os níveis de tráfego ficaram dispostos nas parcelas, que apresentaram dimensões de 40 x 5 m, e os níveis de calcário nas subparcelas, com dimensões de 20 x 5 m. Os tratamentos foram repetidos em três blocos ao acaso, que compuseram a área experimental numa disposição fatorial com parcelas subdivididas (FIGURA 1a).

A análise estatística dos dados foi realizada através do programa estatístico SANEST (Sistema de Análise Estatística). Os dados foram submetidos à análise de variância e à comparação de médias através do teste de DUNCAN com $p = 0,05$.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados mostra que não houveram efeitos isolados, estatisticamente significativos, dos preparos de solo e dos níveis de calcário sobre a densidade de massa seca, a densidade de comprimento e o raio médio de raízes (TABELAS 6 e 7). Por outro lado, houveram efeitos significativos das distâncias de amostragem, do tráfego e das profundidades de amostragem sobre alguns parâmetros radiculares avaliados, como também, ocorreram algumas interações significativas.

4.1. CULTURA DE MILHO

4.1.1. Densidade de massa seca e de comprimento de raízes

Como o comportamento destas variáveis foi bastante semelhante, os gráficos e as tabelas referentes à densidade de massa seca de raízes estão apresentados no ANEXO I. A discussão que segue refere-se à densidade de comprimento de raízes.

Analisando-se o efeito das distâncias de amostragem (FIGURA 5), observa-se que junto à planta, a quantidade de raízes diferiu estatisticamente das distâncias a 20 e a 40 cm da planta na camada de 0-40 cm. Com a profundidade, junto à planta, as diferenças entre as camadas foram mais pronunciadas, ao passo que nas posições a 20 e a 40 cm da planta, somente ocorreu diferença significativa entre a camada de 0-10 cm em relação às demais. Esta distribuição espacial de raízes com as maiores quantidades

TABELA 8 : ANÁLISE DA VARIÂNCIA DA DENSIDADE DE MASSA SECA, DA DENSIDADE DE COMPRIMENTO E DO RAIÓ MÉDIO DE RAÍZES, EM RELAÇÃO A PREPAROS DE SOLO, A NÍVEIS DE CALCÁRIO, A DISTÂNCIA E A PROFUNDIDADE DE AMOSTRAGEM PARA A CULTURA DE MILHO.

Fontes de variação	GL	Massa seca		Comprimento		Raio médio	
		QM	F	QM	F	QM	F
Bloco	1	0,03373	0,0608ns	31,4477	1,5156ns	$3,9 \cdot 10^{-5}$	1,000ns
Prep	1	0,01962	0,0353ns	2,6136	0,1260ns	$3,2 \cdot 10^{-5}$	0,820ns
Resíduo(A)	1	0,5552		20,7497		$3,9 \cdot 10^{-5}$	
Parcelas	3	0,2028		18,2703		$3,7 \cdot 10^{-5}$	
Calc	1	0,0466	0,1396ns	0,1047	0,0210ns	$1,0 \cdot 10^{-5}$	0,608ns
Prep * Calc	1	0,0545	0,1632ns	13,2973	2,6619ns	$8,0 \cdot 10^{-5}$	0,708ns
Resíduo (B)	2	0,3341		4,9954		$2,8 \cdot 10^{-5}$	
Subparcelas	7	0,1968		11,1720		$2,6 \cdot 10^{-4}$	
Dist	2	3,6623	18,2753**	273,1558	30,612**	$1,0 \cdot 10^{-4}$	7,439*
Prep * Dist	2	0,0123	0,0613ns	9,8610	1,1051ns	$8,1 \cdot 10^{-5}$	0,580ns
Calc * Dist	2	0,0591	0,2902ns	0,9077	0,1017	$3,2 \cdot 10^{-5}$	2,284ns
Prep * Calc * Dist	2	0,0125	0,0622ns	1,7706	0,1984ns	$4,5 \cdot 10^{-5}$	0,322ns
Resíduo (C)	8	0,2004		8,9231		$1,4 \cdot 10^{-5}$	
Sub-subparcelas	23	0,4553		31,3469		$2,6 \cdot 10^{-5}$	
Prof	5	3,3465	50,5367**	226,8633	45,998**	$1,4 \cdot 10^{-4}$	19,03**
Prep * Prof	5	0,1212	1,8305ns	4,4843	0,9092ns	$1,3 \cdot 10^{-5}$	1,802ns
Calc * Prof	5	0,0145	0,2191ns	1,4082	0,2855ns	$1,2 \cdot 10^{-5}$	1,659ns
Dist * Prof	10	0,7630	11,5220**	48,7011	9,8745**	$1,0 \cdot 10^{-5}$	1,410ns
Prep * Calc * Prof	5	0,0023	0,0345ns	1,6810	0,3408ns	$8,1 \cdot 10^{-6}$	1,109ns
Prep * Dist * Prof	10	0,0285	0,4307ns	9,5858	1,9436ns	$1,4 \cdot 10^{-5}$	1,9898*
Calc * Dist * Prof	10	0,0189	0,2863ns	5,0970	1,0335ns	$4,7 \cdot 10^{-6}$	0,640ns
Prep*Calc*Dist*Prof	10	0,0087	0,1319ns	0,6790	0,1377ns	$5,1 \cdot 10^{-6}$	0,724ns
Resíduo (D)	20	0,0662		4,9320		$7,3 \cdot 10^{-6}$	
Total	287						
Média geral		0,2802		2,8604			0,014
C. V. (A)		44,32		26,54			7,62
C. V. (B)		48,62		18,42			9,13
C. V. (C)		65,22		42,63			11,14
C. V. (D)		91,83		77,64			19,75

* e ** : níveis de significância a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente pelo teste de DUNCAN.

TABELA 7 : ANÁLISE DE VARIANÇIA DA DENSIDADE DE MASSA SECA, DA DENSIDADE DE COMPRIMENTO E DO RAIÓ MÉDIO DE RAÍZES, EM RELAÇÃO A PREPAROS DE SOLO, A NÍVEIS DE CALCÁRIO, A TRÁFEGO E A PROFUNDIDADE DE AMOSTRAGEM PARA A CULTURA DE SOJA.

Fontes de variação	GL	Massa seca		Comprimento		Raio médio	
		QM	F	QM	F	QM	F
Bloco	2	2,0742	4,129 ns	95,1625	2,6672ns	$2,3 \cdot 10^{-6}$	0,2775ns
Prep	1	0,0013	0,0026ns	10,1293	0,2839ns	$1 \cdot 10^{-7}$	0,0077ns
Resíduo(A)	2	0,5023		35,6793		$8,3 \cdot 10^{-7}$	
Parcelas	5						
Calc	1	1,0739	1,8203ns	0,8971	0,1617ns	$3,05 \cdot 10^{-5}$	4,8018ns
Prep * Calc	1	0,7586	1,2860ns	113,1755	20,4034*	$2,37 \cdot 10^{-5}$	3,7385ns
Resíduo (B)	4	0,5899		5,5469		$6,3 \cdot 10^{-6}$	
Subparcelas	11						
Tráfego	1	0,6985	0,7167ns	110,1072	7,9156*	$5,58 \cdot 10^{-5}$	4,9439ns
Prep * Tráf	1	0,4703	0,4826ns	8,8751	0,6380ns	$5,5 \cdot 10^{-6}$	0,4875ns
Calc * Tráf	1	0,0496	0,0509ns	12,4358	0,8940ns	$1,18 \cdot 10^{-5}$	1,0413ns
Prep * Calc * Tráf	1	0,6058	0,6216ns	4,7788	0,3438ns	$1,23 \cdot 10^{-5}$	1,0858ns
Resíduo (C)	8	0,9746		13,9102		$1,13 \cdot 10^{-5}$	
Sub-subparcelas	23						
Prof	3	92,44	288,1611**	2839,637	284,249**	$4,0 \cdot 10^{-4}$	106,9734**
Prep * Prof	3	0,0074	0,0231ns	10,7334	1,0744ns	$3,1 \cdot 10^{-6}$	0,8398ns
Calc * Prof	3	0,7539	2,3500ns	1,5384	0,1540ns	$7,0 \cdot 10^{-7}$	0,1967ns
Tráf * Prof	3	0,6092	1,8990ns	77,1210	7,7199**	$7,8 \cdot 10^{-6}$	2,0981ns
Prep * Calc * Prof	3	0,4724	1,4725ns	60,5023	6,0563**	$1,9 \cdot 10^{-6}$	0,5108ns
Prep * Tráf * Prof	3	0,4503	1,4038ns	16,9518	1,6969ns	$5,2 \cdot 10^{-6}$	1,3914ns
Calc * Tráf * Prof	3	0,0232	0,0725ns	6,8086	0,6815ns	$2,3 \cdot 10^{-6}$	0,6136ns
Prep*Calc*Tráf*Prof	3	0,3263	1,0173ns	0,7397	0,0740ns	$3,4 \cdot 10^{-6}$	0,9128ns
Resíduo (D)	144	0,3208		9,9899		$3,7 \cdot 10^{-6}$	
Total	191						
Média geral		0,8409		5,4347		0,0118	
C. V. (A)		21,07		27,48		6,11	
C. V. (B)		32,29		15,32		7,57	
C. V. (C)		58,70		34,31		14,27	
C. V. (D)		67,38		58,16		18,40	

* e ** : níveis de significância a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente pelo teste de DUNCAN.

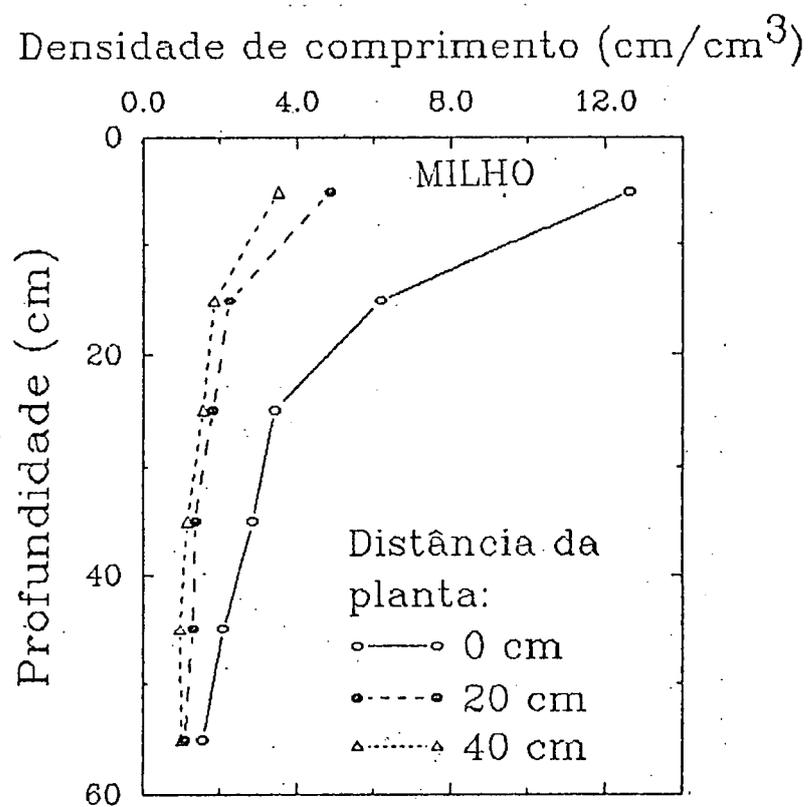


FIGURA 5 : EFEITOS DAS DISTÂNCIAS E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES.

próximas à planta e na superfície, ocorre devido estrutura padrão do sistema radicular e às condições, geralmente, mais adequadas ao desenvolvimento radicular nas camadas superficiais de solo como, disponibilidade de nutrientes, aeração e atividade biológica. Vários autores relatam este fato (MITCHELL e RUSSEL, 1971; BARBER, 1978; RUSSEL, 1981; BARRETO, 1991).

Na TABELA 8, verifica-se comportamento similar ao do efeito isolado das distâncias de amostragem (FIGURA 5), com o comprimento de raízes na posição junto à planta diferindo das posições a 20 e a 40 cm, na camada de 0-20 cm.

Na TABELA 9, nota-se que as médias dos preparos de solo não diferiram estatisticamente, como também, as dos níveis de calcário. Porém, a distância de amostragem junto à planta diferiu significativamente das demais em todos os tratamentos.

O efeito dos preparos de solo com a profundidade está apresentado na FIGURA 6. Verifica-se que houve concentração de raízes na camada de 0-20 cm, mostrando que não ocorreu alteração na distribuição espacial padrão de raízes em função dos preparos de solo. Esta ausência de efeitos dos preparos provavelmente foi devido às condições químicas do solo (TABELA 10) que não se mostraram impeditivas. Houve tendência para o comprimento de raízes ser 10,8% maior no preparo de solo a 20 cm na camada de 0-20 cm e ser 7,7% maior na camada de 20-40 cm no preparo de solo a 60 cm.

TABELA 8 : EFEITO DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS DISTÂNCIAS DE AMOSTRAGEM EM FUNÇÃO DAS PROFUNDIDADES NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES (cm/cm^3) DA CULTURA DE MILHO.

Prof. (cm)	Preparo de solo (20cm)					
	Sem Calcário			Com Calcário		
	Distância da planta (cm)			Distância da planta (cm)		
	0 (linha)	20 (entrel)	40 (entrel)	0 (linha)	20 (entrel)	40 (entrel)
0-10	12,571a	4,665b	2,948b	17,828a	4,279b	2,634b
10-20	7,118a	0,546b	1,694b	7,077a	2,546b	2,316b
20-30	3,130a	1,791a	1,374a	2,655a	2,005a	1,279a
30-40	2,484a	1,084a	0,954a	2,598a	1,411a	1,254a
40-50	2,010a	1,195a	0,729a	2,038a	1,635a	1,127a
50-60	1,769a	0,951a	0,664a	1,808a	1,173a	1,062a
	Preparo de solo (60cm)					
	Sem Calcário			Com Calcário		
	Distância da planta (cm)			Distância da planta (cm)		
	0 (linha)	20 (entrel)	40 (entrel)	0 (linha)	20 (entrel)	40 (entrel)
0-10	9,553a	6,161b	4,677b	10,586a	4,315b	3,792b
10-20	6,176a	2,625b	1,621b	4,371a	1,531a	1,526a
20-30	4,300a	2,340a	1,461a	3,628a	1,844a	1,410a
30-40	4,167a	1,758a	1,247a	2,158a	1,337a	1,043a
40-50	2,406a	1,050a	0,886a	1,896a	1,490a	0,973a
50-60	1,326a	1,301a	0,915a	1,377a	1,318a	0,967a

Médias seguidas de mesma letra não diferem ao nível de 5% pelo teste de DUNCAN (na horizontal).

ABELA 9 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS DISTANCIAS DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES (cm/cm^3) DA CULTURA DE MILHO.

Distância da planta (cm)	Prep. de solo (20 cm)		Média	Prep. de solo (60 cm)		Média	Média de preparos
	Sem calc.	Com calc.		Sem calc.	Com calc.		
(0) linha	4,847a	5,667a	5,257a	4,651a	4,003a	4,327a	4,792a
(20) entrel	2,039b	1,989b	2,014b	2,448b	1,973b	2,210b	2,112b
(40) entrel	1,394b	1,798b	1,596b	1,899b	1,619b	1,759b	1,677b
Média	2,750a	3,151a	2,956a	2,999a	2,532a	2,765a	2,860
Média	2,956a			2,765a			2,860

édias seguidas de mesma letra não diferem ao nível de 5% pelo teste de DUNCAN.

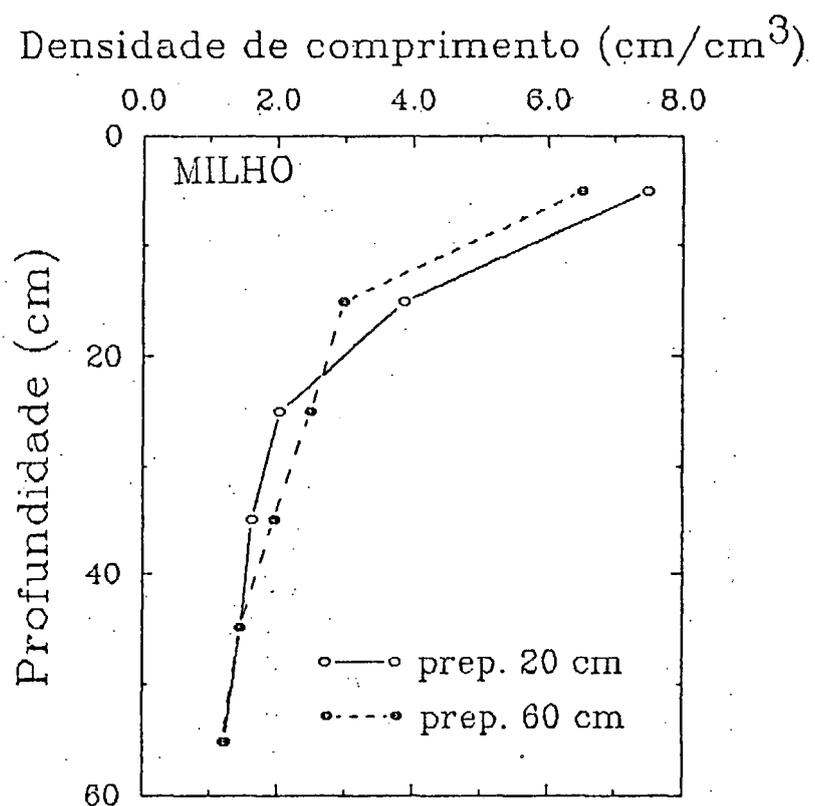


FIGURA 6 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES.

TABELA 10 : RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO NO PRIMEIRO ANO APÓS A IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO.

Prof. (cm)	pH CaCl ₂	meq/100 cm ³ de solo					P ppm	C %
		Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺		
Preparo a 20 cm sem calcário.								
0-10	5.8	0.0	3.6	7.8	4.9	0.35	15.0	2.5
10-20	5.8	0.0	4.4	7.0	4.1	0.23	10.0	2.5
20-30	5.4	0.0	5.2	5.0	2.7	0.18	6.0	2.3
30-40	4.8	0.1	5.5	2.1	1.2	0.10	1.0	1.8
40-50	4.7	0.2	5.2	1.7	1.0	0.08	1.0	1.5
50-60	4.8	0.1	5.2	1.8	0.9	0.06	1.0	1.5
Preparo a 20 cm com calcário.								
0-10	6.3	0.0	2.7	8.5	5.0	0.28	15.0	2.8
10-20	6.0	0.0	3.8	7.4	4.2	0.21	10.0	2.8
20-30	5.5	0.0	5.0	5.1	2.9	0.16	5.0	2.7
30-40	4.9	0.2	5.9	2.1	1.1	0.08	1.0	1.9
40-50	4.8	0.1	5.5	1.9	1.1	0.06	1.0	1.7
50-60	4.8	0.0	5.1	1.8	1.0	0.04	1.0	1.5
Preparo a 60 cm sem calcário.								
0-10	5.7	0.0	4.4	6.1	3.5	0.32	13.0	2.6
10-20	5.7	0.0	4.3	6.0	3.4	0.29	11.0	2.4
20-30	5.6	0.0	4.4	5.6	3.2	0.16	11.0	2.2
30-40	5.4	0.0	4.8	4.2	2.3	0.13	7.0	2.0
40-50	5.4	0.0	4.6	4.5	2.5	0.12	9.0	2.1
50-60	5.3	0.0	4.8	3.4	1.9	0.10	3.0	1.8
Preparo a 60 cm com calcário.								
0-10	6.1	0.0	2.6	7.6	4.4	0.22	18.0	2.2
10-20	6.2	0.0	2.5	7.6	4.3	0.19	11.0	2.2
20-30	6.2	0.0	2.6	7.1	4.0	0.12	10.0	2.1
30-40	6.1	0.0	3.0	6.6	3.7	0.10	10.0	2.0
40-50	6.1	0.0	3.8	6.9	4.1	0.11	12.0	2.0
50-60	5.7	0.0	3.8	4.2	2.3	0.07	3.0	1.6

Médias de três repetições

Na FIGURA 7, verifica-se que ocorreu comportamento semelhante na distribuição espacial de raízes em função da calagem, com os maiores valores de comprimento de raízes situados na camada de 0-20 cm. Estes resultados estão de acordo com aqueles obtidos por ENGELBERT e TRUOG (1956); CAMPBELL et al. (1974).

Os efeitos dos preparos de solo e dos níveis de calcário são mostrados na FIGURA 8. Verifica-se que não houveram diferenças estatisticamente significativas, porém ocorreu tendência para o comprimento de raízes ser 6,9% maior na camada de 0-20 cm, no preparo a 20 cm, ao passo que na camada de 20-40 cm, o comprimento de raízes tendeu ser 6,1% maior no preparo a 60 cm

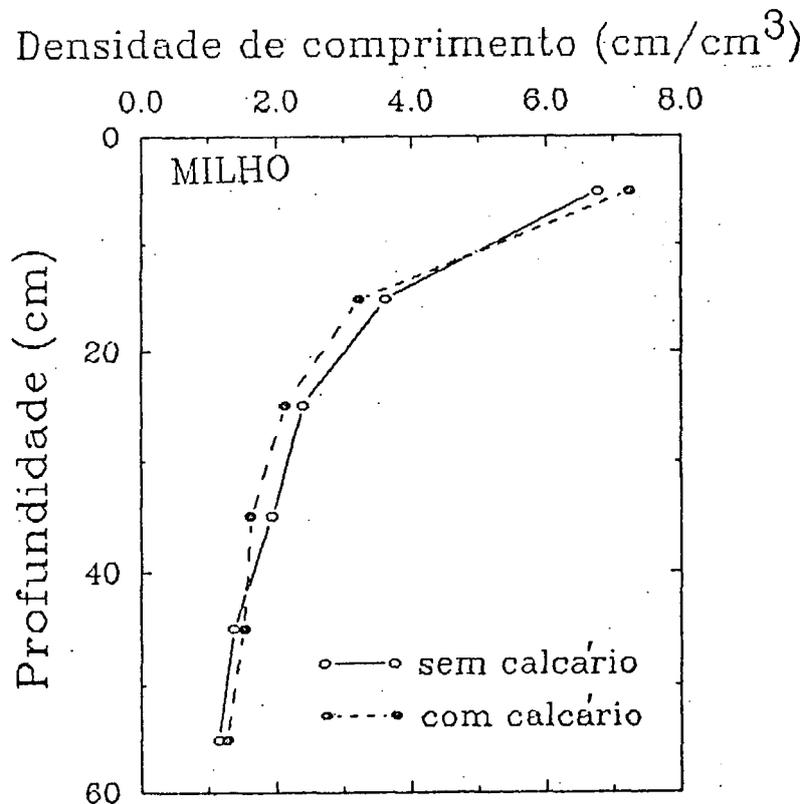


FIGURA 7 : EFEITOS DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES.

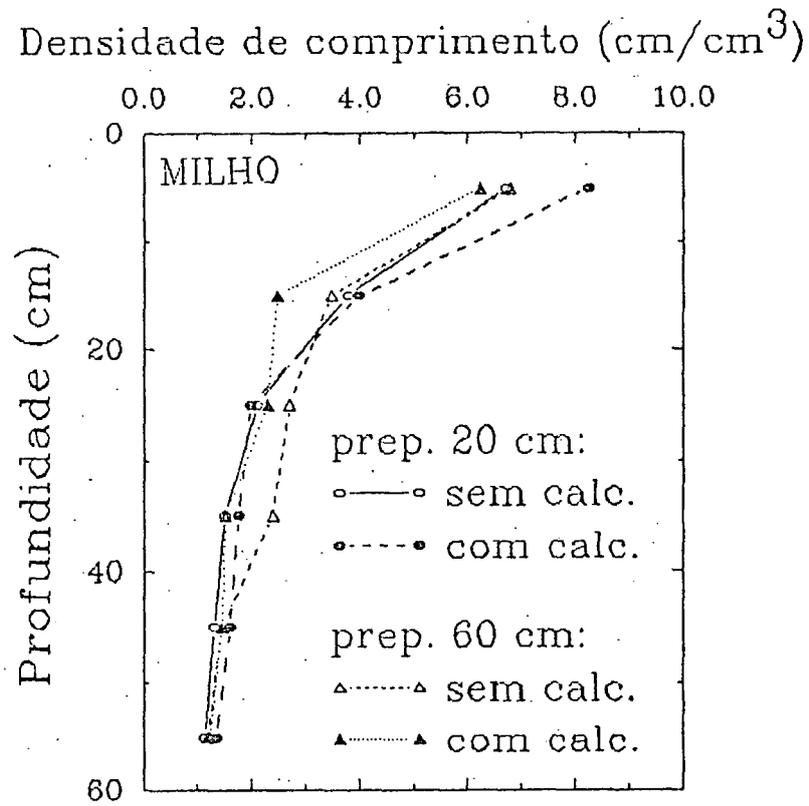


FIGURA 8 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES.

4.1.1.1. Adição de matéria seca ao solo

A quantidade de matéria seca adicionada ao solo no ciclo da cultura de milho está apresentada na TABELA 11. Tomando-se o valor médio dos tratamentos, nota-se que foram adicionadas ao solo, aproximadamente, 1,681 t/ha de matéria seca, na camada de 0-60 cm, pelo sistema radicular no ciclo da cultura de milho. Deste total, 46,10% de matéria seca concentrou-se entre 0-10 cm; 22,01% entre 10-20 cm; 12,61% entre 20-30 cm; 8,57% entre 30-40 cm; 6,31% entre 40-50 cm e 4,40% entre 50-60 cm de profundidade, respectivamente.

TABELA 11 : MATÉRIA SECA (t/ha) ADICIONADA AO SOLO PELO SISTEMA RADICULAR DA CULTURA DE MILHO.

Prof. (cm)	Prep. de solo (20 cm)		Preparo de solo (60 cm)		Média
	S/ Calc.	C/ Calcário	S/ Calcário	C/ Calcário	
0-10	0,724a	0,698a	0,869a	0,807a	0,775
10-20	0,483a	0,443a	0,331a	0,222a	0,370
20-30	0,228a	0,223a	0,214a	0,184a	0,212
30-40	0,137a	0,141a	0,193a	0,106a	0,144
40-50	0,082a	0,135a	0,115a	0,092a	0,106
50-60	0,070a	0,096a	0,067a	0,063a	0,074
Média	1,724a	1,736a	1,789a	1,474a	1,681

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% pelo teste de DUNCAN (na horizontal).

Os dados de matéria seca foram obtidos através da densidade de massa seca de raízes, sendo que estes dados foram inferiores aos obtidos por FEHRENBACHER e SNIDER (1954), que encontraram de 2,029 a 2,677 t/ha de matéria seca de raízes de milho, entre 0-72 cm de profundidade. PEDÓ (1986) encontrou 2,01 t/ha de massa seca

de raízes de milho entre 0-40 cm de profundidade.

BARRETO (1991) relatou valores de densidade de massa seca de raízes de milho, coletadas através do método do trado de 0,881 mg/cm³ entre 0-10 cm; de 0,445 mg/cm³ entre 10-20 cm; de 0,191 mg/cm³ entre 20-30 cm; de 0,093 mg/cm³ entre 30-40 cm e de 0,075 mg/cm³ entre 40-50 cm de profundidade, respectivamente. Desta forma, 52,28% da massa de raízes concentrou-se entre 0-10 cm; 26,41% entre 10-20 cm; 11,34% entre 20-30 cm; 5,52% entre 30-40 cm e 4,45% entre 40-50 cm de profundidade, respectivamente. Analisando-se a TABELA 11, onde os valores representados na forma de t/ha equivalem a mg/cm³, nota-se que os resultados do presente estudo foram bastante similares a àqueles obtidos no estudo do referido autor.

4.1.2. Raio médio de raízes

Verifica-se que o raio médio foi em média maior na posição de amostragem junto à planta (FIGURA 9). Nas distâncias a 20 e a 40 cm em algumas camadas houve ausência de diferenças estaticamente significativas. Com a profundidade, ocorreu um decréscimo gradual do raio médio para as três posições de amostragem. Esta distribuição do raio médio de raízes pode ter ocorrido em função da estrutura padrão do sistema radicular, e as variações podem ser esperadas pela existência de interação tripla entre preparos de solo, distâncias e profundidades de amostragem, e devido a possíveis desuniformidades no perfil de solo.

Na TABELA 12, o raio médio nos tratamentos com calcário

apresentou tendência para ser uniforme nas três distâncias de amostragem. Nos tratamentos sem calcário ocorreram maiores variações entre as posições de amostragem.

Na TABELA 13, nota-se que houve apenas o efeito das distâncias de amostragem sobre o raio médio, com tendência para os maiores valores situarem-se junto à planta e a 20 cm.

O comportamento do raio médio em função dos preparos de solo (FIGURA 10), mostrou-se similar nos dois preparos, com decréscimo gradual em função da profundidade. Em relação aos níveis de calcário (FIGURA 11), o comportamento do raio médio tendeu a ser uniforme na camada de 0-40 cm no nível com calcário. Na FIGURA 12 é possível verificar tendência para o raio médio ser em média 13,3% menor no preparo de solo a 60 cm.

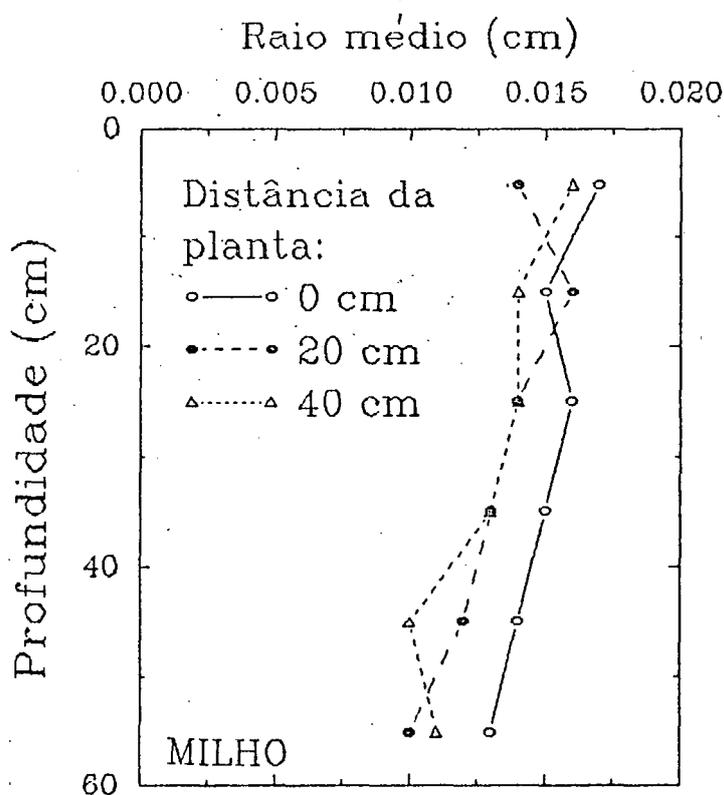


FIGURA 9 : EFEITOS DAS DISTÂNCIAS E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NO RAI0 MÉDIO DE RAÍZES.

TABELA 12: EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NIVEIS DE CALCÁRIO E DAS DISTANCIAS DE AMOSTRAGEM EM FUNÇÃO DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NO RAIÓ MÉDIO DE RAÍZES (cm) DA CULTURA DE MILHO.

Prof. (cm)	Preparo de solo (20cm)					
	Sem Calcário			Com Calcário		
	Distância da planta (cm)			Distância da planta (cm)		
	0 (linha)	20 (entrel)	40 (entrel)	0 (linha)	20 (entrel)	40 (entrel)
0-10	0.016a	0.014a	0.016a	0.014a	0.014a	0.016a
10-20	0.016ab	0.018a	0.013b	0.016a	0.015a	0.014a
20-30	0.015ab	0.016a	0.012b	0.017a	0.015a	0.015a
30-40	0.015a	0.012ab	0.008b	0.017a	0.014a	0.015a
40-50	0.012a	0.012a	0.011a	0.013a	0.011a	0.012a
50-60	0.013a	0.011a	0.013a	0.012a	0.012a	0.012a
	Preparo de solo (60cm)					
	Sem Calcário			Com Calcário		
	Distância da planta (cm)			Distância da planta (cm)		
	0 (linha)	20 (entrel)	40 (entrel)	0 (linha)	20 (entrel)	40 (entrel)
0-10	0.018a	0.015ab	0.014b	0.018a	0.012b	0.018a
10-20	0.014a	0.015a	0.014a	0.014a	0.015a	0.016a
20-30	0.015a	0.012a	0.013a	0.016a	0.013a	0.014a
30-40	0.014a	0.013a	0.013a	0.014a	0.013a	0.015a
40-50	0.016a	0.012b	0.009b	0.013a	0.011ab	0.008a
50-60	0.013a	0.009b	0.008b	0.011a	0.010a	0.010a

Médias seguidas de mesma letra não diferem ao nível de 5% pelo teste de DUNCAN (na horizontal).

TABELA 13 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS DISTANCIAS DE AMOSTRAGEM NO RAIO MÉDIO DE RAÍZES (cm) DA CULTURA DE MILHO.

Distância da planta (cm)	Preparo de solo (20 cm)		Média	Prep. de solo (60 cm)		Média	Média de preparos
	Sem calc.	Com calc.		Sem calc.	Com calc.		
(0)linha	0.015a	0.015a	0.015a	0.015a	0.014a	0.015a	0.015a
(20)entrel	0.014ab	0.014ab	0.014b	0.013b	0.013b	0.013ab	0.013b
(40)entrel	0.012b	0.013b	0.013b	0.012b	0.012b	0.012b	0.013b
Média	0.014a	0.014a	0.014a	0.013a	0.013a	0.013a	0.014
Média	0.014a			0.013a			0.014

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% pelo teste de DUNCAN.

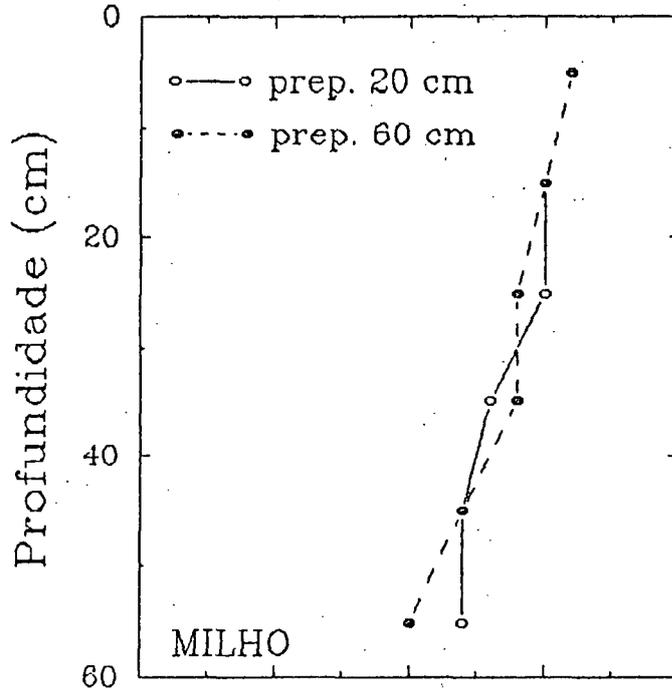


FIGURA 10 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NO RAI0 MÉDIO DE RAÍZES .

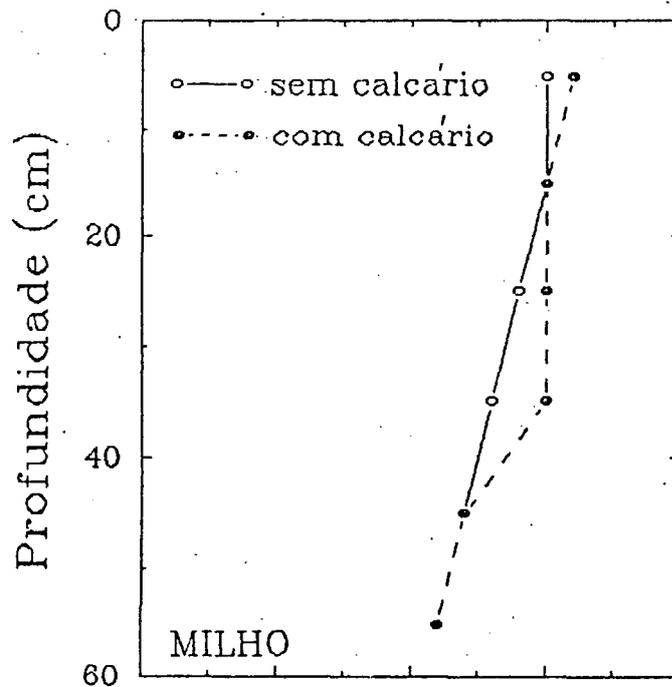


FIGURA 11 : EFEITOS DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NO RAI0 MÉDIO DE RAÍZES.

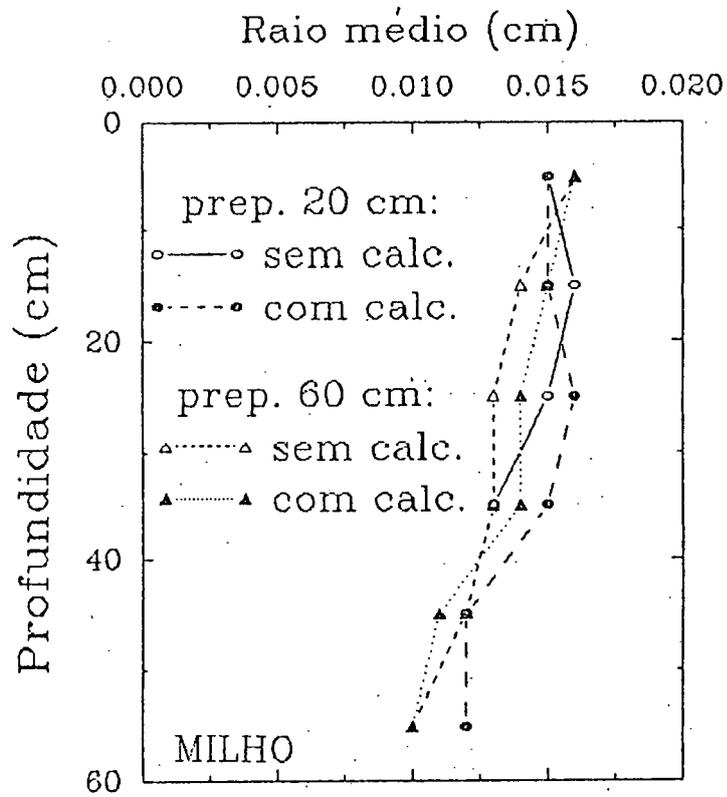


FIGURA 12 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS PROFUNDIDADES NO RAIÓ MÉDIO DE RAÍZES.

4.1.3. Efeito da resistência à penetração na densidade de comprimento de raízes da cultura de milho

Verifica-se que o comprimento radicular foi significativamente maior na linha da cultura, na camada de 0-10 cm (FIGURA 13), o que se justifica pela estrutura padrão do sistema radicular. Os valores de resistência à penetração foram menores, pois não houve tráfego de máquinas na linha amostrada.

Na entre-linha, o comprimento radicular foi menor e a resistência à penetração maior. Isto pode ter ocorrido porque à medida que se aumenta a distância e a profundidade de amostragem a densidade radicular diminui (RUSSEL, 1981; DEXTER, 1988), e devido ao tráfego da colheitadeira. Tomando-se os valores de resistência à penetração entre 1,1 e 1,8 MPa (CINTRA e MIELNICZUK, 1983) e entre 0,7 e 2,0 MPa (TAYLOR e RATLIFF, 1969 b), como impeditivos, possivelmente ocorreram impedimentos ao crescimento radicular. Porém, não é possível concluir se houve ou não impedimentos às raízes porque não foi realizada amostragem na entre-linha sem tráfego. Por outro lado, considerando como críticos os valores entre 2,0 e 3,0 MPa (TAYLOR e GARDNER, 1963; TAYLOR e BURNETT, 1964; TAYLOR et al., 1966; HEMSATH e MAZURAK, 1974; BOONE e VEEN, 1982), provavelmente, não houveram condições impeditivas ao desenvolvimento das raízes.

A densidade de raízes diminuiu com a profundidade, e a resistência à penetração apresentou valores semelhantes. Na entre-linha, ambas decresceram com a profundidade.

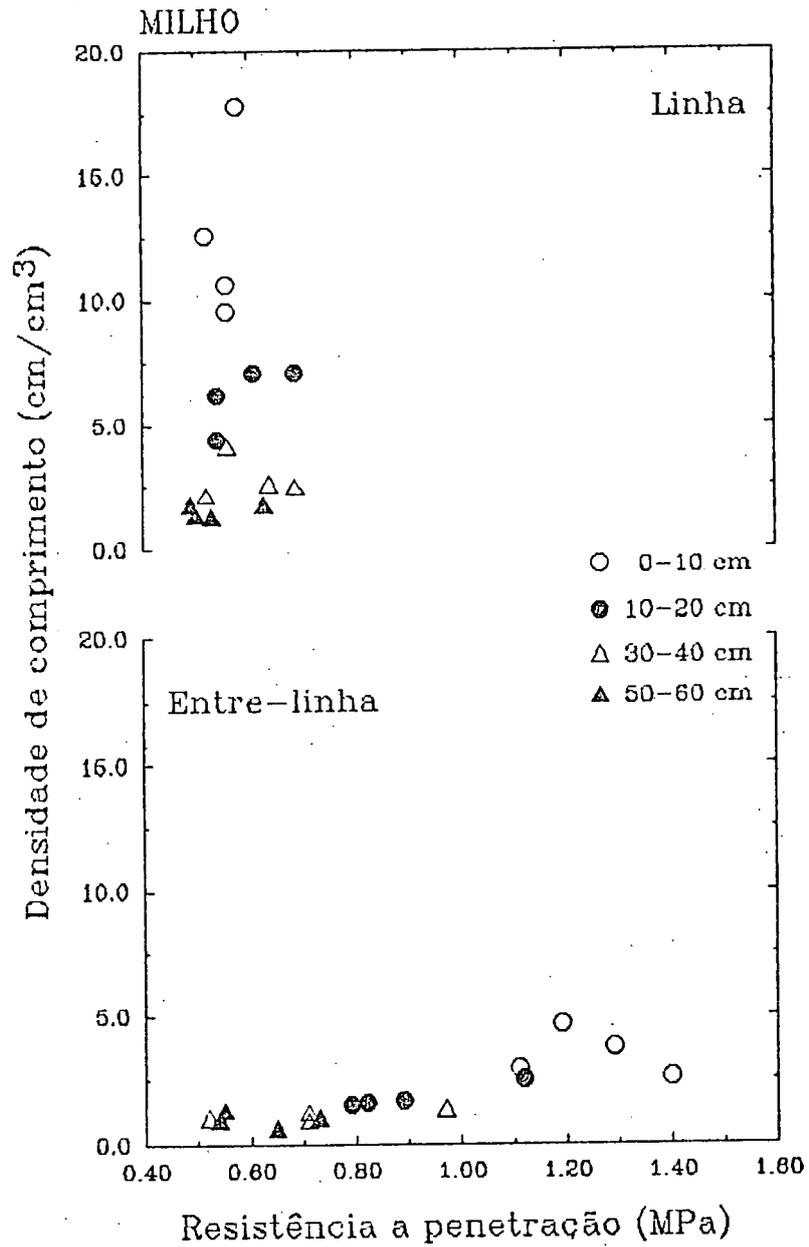


FIGURA 13 : EFEITO DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES.

4.1.4. Efeito da densidade do solo na densidade de comprimento de raízes da cultura de milho

Nota-se que a densidade de raízes foi significativamente maior na camada de 0-10 cm na linha (FIGURA 14) e os valores de densidade do solo foram menores, devido à ausência de tráfego.

A densidade do solo na entre-linha foi maior devido ao tráfego da colheitadeira, e a densidade de raízes menor devido ao padrão de distribuição de raízes e possivelmente devido aos altos valores de densidade do solo. Tomando-se os valores de densidade do solo entre 1,30 e 1,50 g/cm³ como críticos para solos de textura média e argilosa (PHILLIPS e KIRKHAM, 1962; SCHURMAN, 1965; BORGES et al., 1988), nota-se que a densidade do solo pode ter sido impeditiva ao desenvolvimento radicular.

O comprimento radicular e a densidade do solo decresceram com a profundidade na linha e na entre-linha, como era de se esperar.

4.1.5. Efeito da porosidade de aeração na densidade de comprimento de raízes da cultura de milho

A porosidade de aeração mostrou-se adequada ao crescimento radicular na linha (FIGURA 15), com valores superiores a 0,10 cm/cm³ (VOMOCIL e FLOCKER, 1961; GRABLE e SIEMER, 1968; NYE e TYNKER, 1977; DEXTER, 1988). Na entre-linha, apareceram valores inferiores a 0,10 cm/cm³, considerados críticos, provavelmente devido ao tráfego da colheitadeira. Porém, estes valores críticos se localizaram onde ocorreram os maiores valores de densidade de comprimento de raízes, na camada de 0-20 cm, o que leva a crer que

eles não interferiram de maneira drástica no desenvolvimento radicular. Na linha e na entre-linha, a densidade de raízes diminuiu com a profundidade, e a porosidade de aeração aumentou.

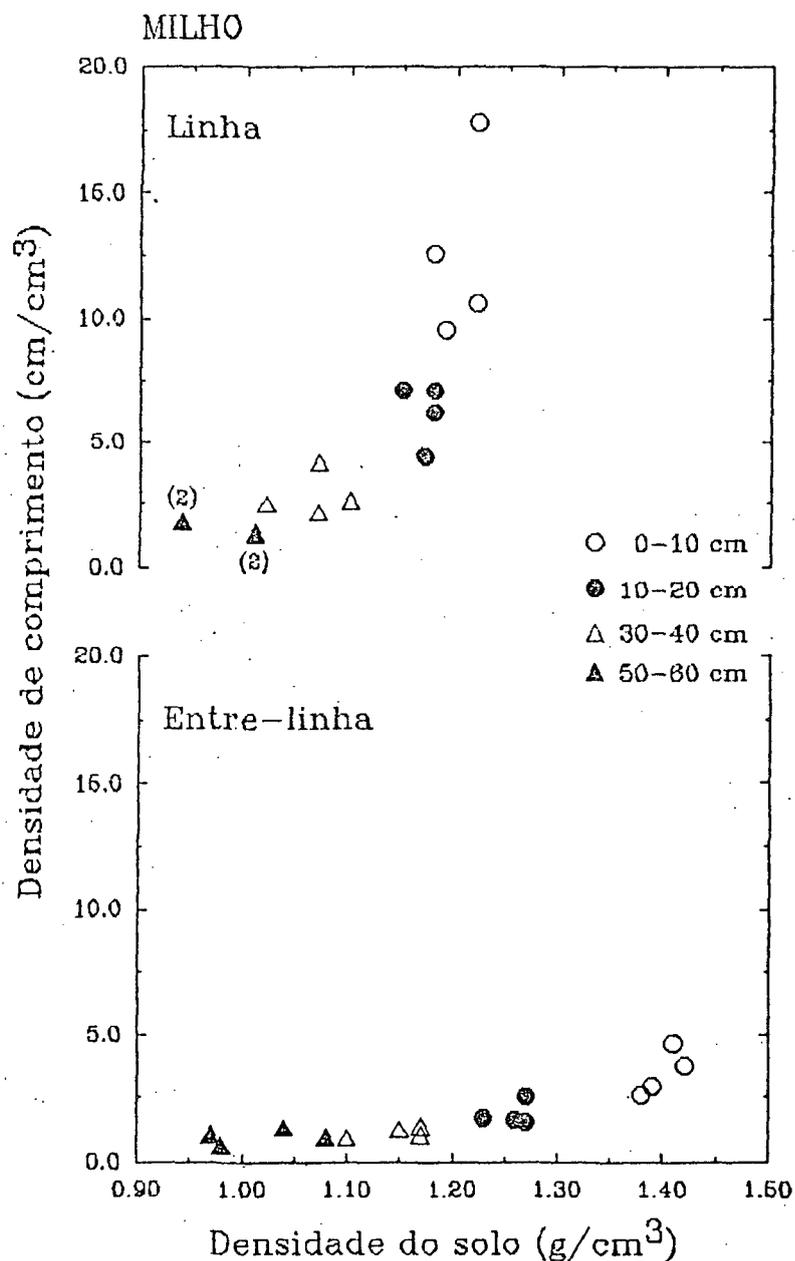


FIGURA 14 : EFEITO DA DENSIDADE DO SOLO NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES.

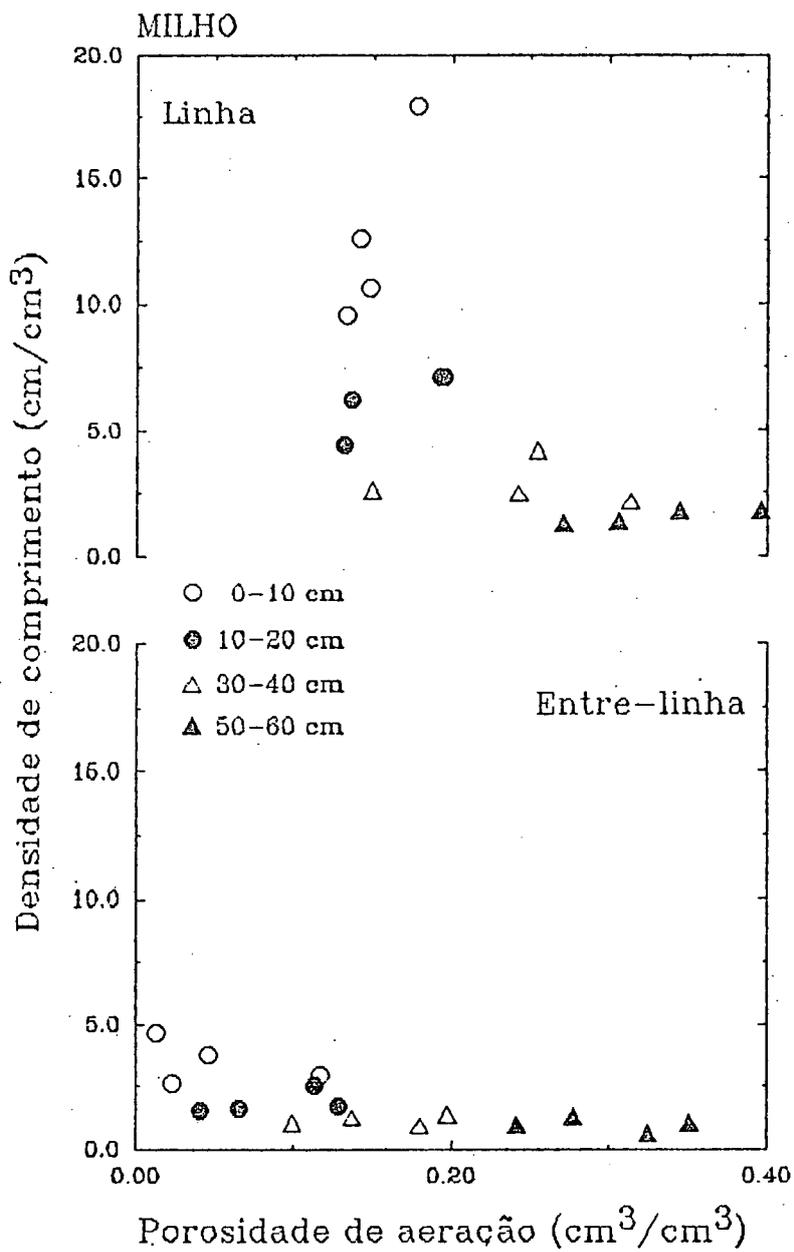


FIGURA 15 : EFEITO DA POROSIDADE DE AERAÇÃO NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES.

4.1.6. Produtividade

Os efeitos dos preparos de solo e dos níveis de calcário na produtividade da cultura de milho foram avaliados pelo teste t (STUDENT) e estão apresentados na TABELA 14.

TABELA 14 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO E DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO (SIGNIFICÂNCIA DO TESTE t) NA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DE MILHO (Kg/ha) NO ANO AGRÍCOLA 89/90.

Tratamentos	Sem Calcário	Com calcário	Média
Preparo de solo (20 cm)	10690a	10072a	10381a #
Preparo de solo (60 cm)	9064a	9615a	9339,5a #
Média	9877a	9843,5a	

(Médias de três valores)

Médias seguidas de mesma letra não diferem ao nível de 5%.

Diferença com nível de significância a 10% de probabilidade.

A análise dos resultados mostra que não houveram efeitos significativos dos preparos de solo e dos níveis de calcário. Porém, se for considerado o nível de significância a 10% de probabilidade, nota-se que houve diferença entre os preparos de solo, com maior produtividade no preparo de solo a 20 cm. Desta forma, o preparo de solo a 60 cm, nas condições do experimento, que para ser realizado demanda um trator de alta potência e a aplicação de uma quantidade de calcário três vezes maior do que a do preparo de solo a 20 cm para atingir a mesma percentagem de

saturação do complexo de troca, é economicamente questionável.

Esta ausência de efeitos dos preparos de solo e da calagem, provavelmente ocorreu devido ao fato de que a área onde o experimento foi implantado vinha sendo cultivada regularmente com plantio convencional com fins comerciais até dois anos antes da sua implantação. Supõe-se que, as condições físicas e químicas de solo não eram inadequadas ao ponto de impedirem o crescimento radicular e, desta forma, diminuir o rendimento das culturas. Estes resultados estão de acordo com aqueles obtidos, por ENGELBERT e TRUOG (1956); CAMPBELL et al. (1974); ROBERTSON et al. (1977), citados por ECK e UNGER (1985); REICOSKY (1983), citado por ECK e UNGER (1985), que somente verificaram resultados benéficos do cultivo e/ou adição de fertilizantes e/ou calcário em profundidade nos rendimentos de culturas, quando da existência de alguma condição física ou química impeditiva. A análise da TABELA 10 mostra a ausência de diferenças acentuadas entre os tratamentos. HOBBS et al. (1961) verificaram que a colocação de fertilizantes em profundidade não promoveu resultados superiores à aplicação em superfície na maioria dos casos. LARSON et al. (1960) encontraram resultados semelhantes para o milho. JAMISON e THORNTON (1960) concluíram que, fertilizando adequadamente a superfície do solo, os aumentos nos rendimentos das culturas são pequenos e de valor questionável.

4.1.7. Sensitividade do método do trado

O método mostrou-se inadequado para detectar pequenas

diferenças, pois, normalmente apresenta altos coeficientes de variação. Segundo NOORDWIJK et al. (1985), os coeficientes de variação na determinação da massa seca de raízes de cereais com este método são em média de 45% nas profundidades de 0-30 cm e de 51% para as de 30-60 cm. Para coeficientes de variação de 40%, considerados normais, são necessárias 25 amostras por tratamento para detectar 22% de diferença entre duas médias, ou de 10 amostras quando a diferença for de 35%. Os coeficientes de variação encontrados no presente trabalho para a massa seca foram ao redor de 91% para a cultura de milho e de 67% para a cultura de soja, na camada de 60 cm.

4.2. CULTURA DE SOJA

4.2.1. Densidade de massa seca e de comprimento de raízes

Como já citado anteriormente, em função do fato de que o comportamento destas variáveis foi bastante similar, apresentamos os gráficos e as tabelas referentes à densidade de massa seca de raízes no ANEXO I, e discutimos a seguir o comportamento da densidade de comprimento de raízes.

Na FIGURA 16, é possível verificar que a quantidade de raízes foi significativamente menor na linha trafegada na camada de 0-10 cm, com valores de 73% daquelas da linha não trafegada. Isto foi verificado por GERIK et al. (1987), que encontraram reduções na densidade radicular de algodão na linha trafegada, no plantio direto, com valores de 65 - 80% daqueles das linhas não

trafegadas, na camada de 0-15 cm. A distribuição de raízes com a profundidade, nas linhas com e sem tráfego na camada de 0-10 cm, diferiu significativamente em relação às demais camadas.

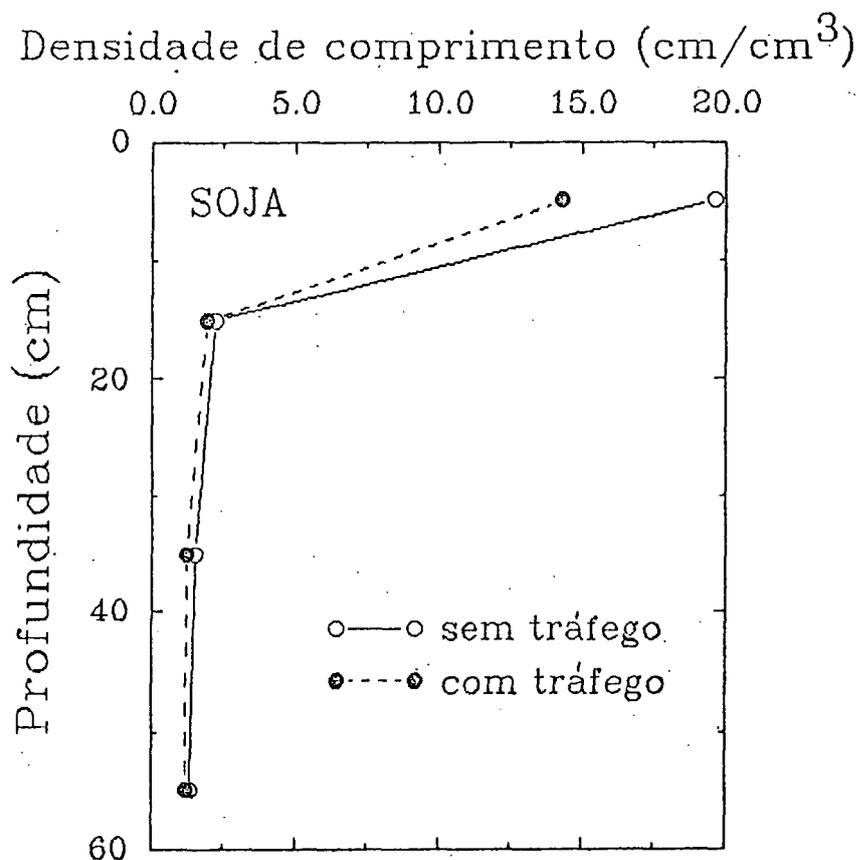


FIGURA 16 : EFEITOS DO TRÁFEGO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES.

Na FIGURA 17, verifica-se que o comprimento de raízes foi significativamente menor na linha com tráfego nos dois preparos de solo, na camada de 0-10 cm. No preparo de solo a 20 cm, a quantidade de raízes na linha trafegada foi 84% daquela da linha não trafegada, ao passo que, no preparo de solo a 60 cm foi 62%, o que indica uma tendência para este preparo de solo ser mais sensível à compactação. Isto mostra o confinamento da compactação nos primeiros 10 cm de profundidade, sendo este resultado similar a aqueles obtidos por GERIK et al. (1987); KASPAR et al. (1991) que verificaram o confinamento da compactação nos primeiros 15 cm de profundidade. A quantidade de raízes na camada de 0-10 cm diferiu em relação às outras camadas.

O comprimento de raízes apresentou-se significativamente menor na linha com tráfego, nos dois níveis de calcário, na camada de 0-10 cm (FIGURA 18). No tratamento sem calcário com tráfego, os valores de densidade de raízes atingiram 80% daqueles valores do tratamento sem tráfego, e no tratamento com calcário com tráfego, atingiram 67% daqueles do sem tráfego. Com a profundidade, houve diferença entre a camada de 0-10 cm em relação às demais.

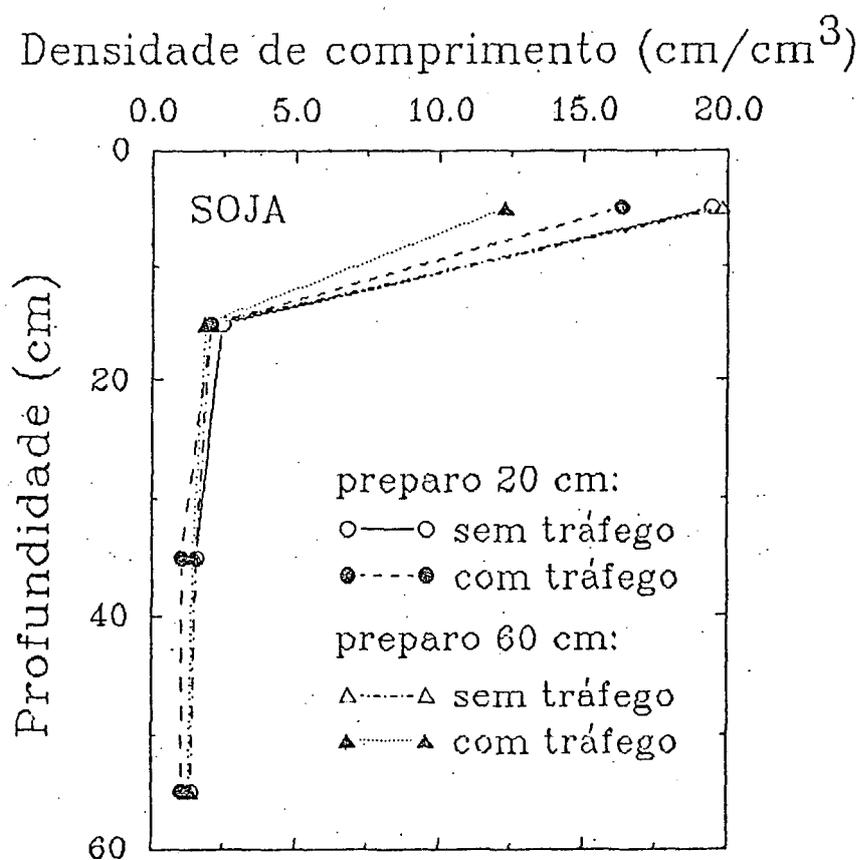


FIGURA 17 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DO TRÁFEGO E DAS PROFUNDIDADES NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES.

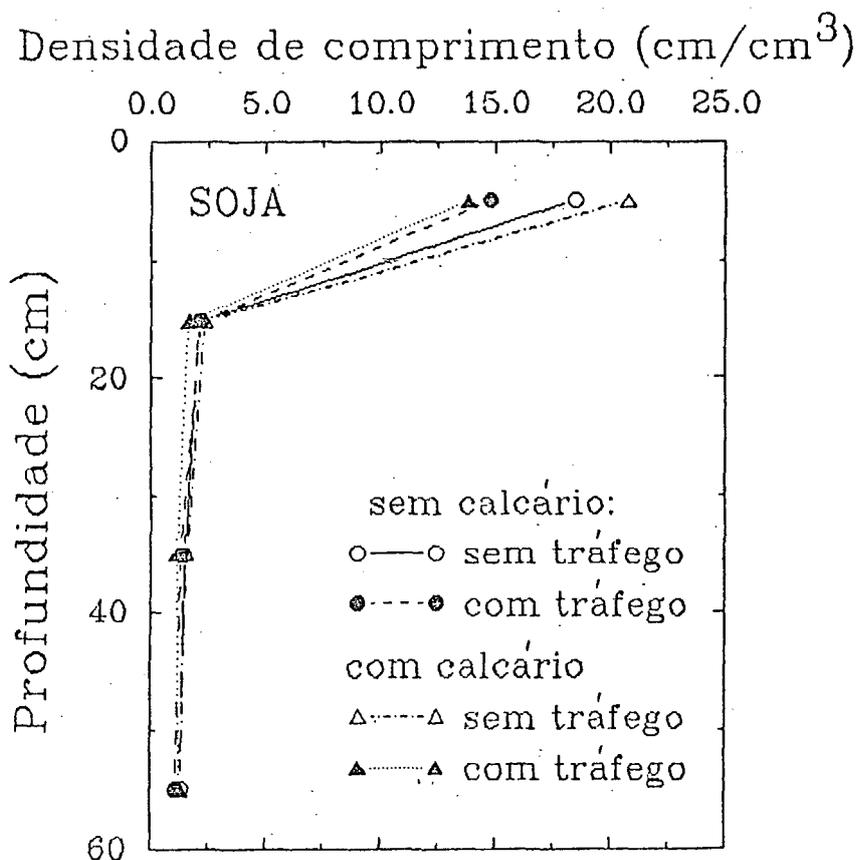


FIGURA 18 : EFEITOS DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO, DO TRÁFEGO E DAS PROFUNDIDADES NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES.

A influência dos preparos de solo e dos níveis de calcário é mostrada na FIGURA 19. No preparo de solo a 20 cm, nota-se que não houve tendência para ocorrer efeito da adição de calcário, uma vez que a densidade de raízes no tratamento com calcário foi de 73% daquela no tratamento sem calcário, na camada de 0-10 cm. Esta ausência de efeitos da calagem possivelmente ocorreu em função das condições químicas do solo (TABELA 15). No preparo de solo a 60 cm, por outro lado, a densidade de raízes no tratamento sem calcário foi 70% daquela do tratamento com calcário, nesta mesma

camada. Em relação à profundidade a camada de 0-10 cm diferiu das demais.

Na TABELA 16, é possível verificar que houve tendência do preparo a 60 cm com calcário ser mais sensível ao tráfego. O efeito da compactação ficou confinado à camada de 0-10 cm, como já discutido anteriormente. Na TABELA 17, nota-se tendência similar para o preparo de solo a 60 cm ser mais sensível ao tráfego.

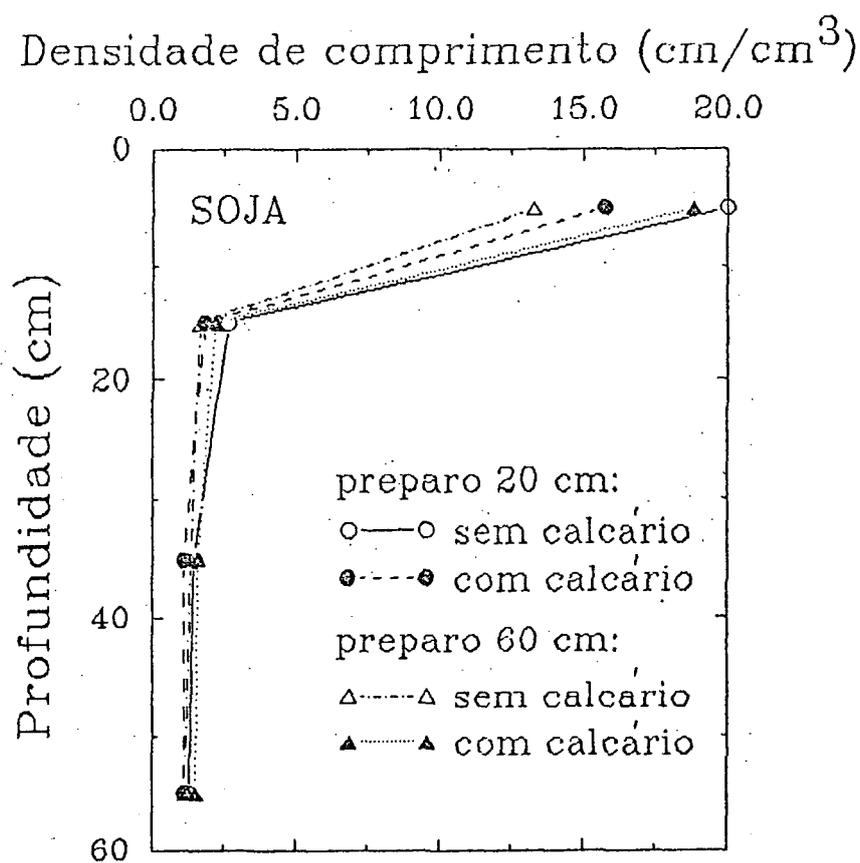


FIGURA 19 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS PROFUNDIDADES NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES.

TABELA 15 : RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO SOLO NO SEGUNDO ANO APÓS A IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO.

Prof. (cm)	pH CaCl ₂	meq/100 cm ³ de solo					P ppm	C %
		Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺		
Preparo a 20 cm sem calcário.								
0-10	6.2	0.0	3.1	7.2	4.3	0.32	9.3	2.1
10-20	6.0	0.0	3.9	6.6	3.9	0.18	6.6	2.1
30-40	4.8	0.0	5.2	1.8	0.9	0.07	1.0	1.2
50-60	4.9	0.0	5.7	1.6	1.0	0.08	1.0	1.0
Preparo a 20 cm com calcário.								
0-10	5.9	0.0	4.1	7.0	4.4	0.2	6.0	1.8
10-20	6.0	0.0	4.1	7.2	4.2	0.12	6.3	2.0
30-40	4.7	0.0	5.7	1.9	1.0	0.05	3.0	1.5
50-60	4.9	0.0	4.7	1.7	0.9	0.05	1.6	1.4
Preparo a 60 cm sem calcário.								
0-10	5.9	0.0	3.7	6.4	4.0	0.25	7.0	2.0
10-20	5.9	0.0	4.1	6.4	4.0	0.16	7.0	2.0
30-40	5.2	0.0	4.8	3.6	2.0	0.06	2.3	1.5
50-60	5.0	0.0	5.2	2.4	1.5	0.06	1.0	1.0
Preparo a 60 cm com calcário.								
0-10	6.2	0.0	2.5	7.4	4.6	0.23	3.6	1.9
10-20	6.5	0.0	2.5	7.4	4.5	0.13	7.0	1.9
30-40	6.3	0.0	3.2	6.1	3.5	0.05	3.0	1.6
50-60	5.8	0.0	3.7	4.2	2.6	0.05	2.4	1.2

Médias de três repetições.

TABELA 16 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DO TRÁFEGO EM FUNÇÃO DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES (cm/cm^3) DA CULTURA DE SOJA.

Profundidade (cm)	Preparo de solo (20cm)			
	S/ calcário		C/ calcário	
	Tráfego		Tráfego	
	sem	com	sem	com
0-10	21.087a	18.908a	17.775a	13.745b
10-20	2.712a	2.614a	2.172a	1.509a
30-40	1.772a	1.197a	1.345a	0.913a
50-60	1.666a	0.954a	1.123a	1.137a
	Preparo de solo (60cm)			
	S/ calcário		C/ calcário	
	Tráfego		Tráfego	
	sem	com	sem	com
0-10	15.893a	10.640b	23.713a	13.913b
10-20	1.528a	1.816a	2.576a	1.847a
30-40	1.249a	1.484a	1.818a	1.408a
50-60	1.046a	1.294a	1.595a	1.458a

Médias seguidas de mesma letra não diferem ao nível de 5% pelo teste de DUNCAN (na horizontal).

TABELA 17 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DO TRÁFEGO NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES (cm/cm^3) DA CULTURA DE SOJA.

Tráf. de colheitadeira	Prep. de solo (20 cm)		Média	Preparo de solo (60 cm)		Média	Média de prep.
	Sem calc.	Com calc.		Sem calcário	Com calcário		
Sem	6.809a	5.604a	6.207a	4.929a	7.429a	6.177a	6.192a
Com	5.918a	4.325a	5.122a	3.809a	4.657b	4.233b	4.677b
Média	6.364a	4.965a	5.664a	4.369a	6.041a	5.205a	5.435
Média	5.664a			5.205a			5.435

Médias seguidas de mesma letra não diferem ao nível de 5% pelo teste de DUNCAN.

4.2.2. Raio médio de raízes

O efeito do tráfego é mostrado na FIGURA 20. Verifica-se que o raio de raízes foi maior na linha com tráfego, diferindo significativamente do valor da linha sem tráfego, na camada de 0-20 cm. Apesar de na TABELA 7, não aparecer efeito significativo do tráfego, nota-se que o raio médio aumentou devido à compactação causada pela colheitadeira. O impedimento mecânico normalmente causa um aumento no diâmetro de raízes (AUBERTIN e KARDOS, 1965; TAYLOR, 1974; VEEN, 1982). O comportamento do raio médio em função da profundidade diferiu daquele apresentado pelas outras variáveis. Houve diminuição gradual com a profundidade e ocorreu diferença significativa entre a camada de 0-10 cm em relação à camada de 10-20 cm que, por sua vez diferiu das demais.

Na FIGURA 21, nota-se que ocorreu efeito do tráfego nos dois preparos de solo, com valores significativamente maiores do raio médio na linha com tráfego. Com a profundidade, o comportamento do raio médio foi semelhante ao verificado na FIGURA 20, com diferença significativa da camada de 0-10 cm em relação à camada de 10-20 cm, que por sua vez, diferiu das demais.

Na FIGURA 22, verifica-se que apesar das diferenças não terem sido significativas, os maiores valores de raio médio situaram-se na linha com tráfego, nos dois níveis de calagem. Em função da profundidade, o comportamento do raio médio foi semelhante ao apresentado nas FIGURAS 20 e 21, com diferença entre a camada de 0-10 cm em relação à camada de 10-20 cm, que por sua vez, diferiu das demais.

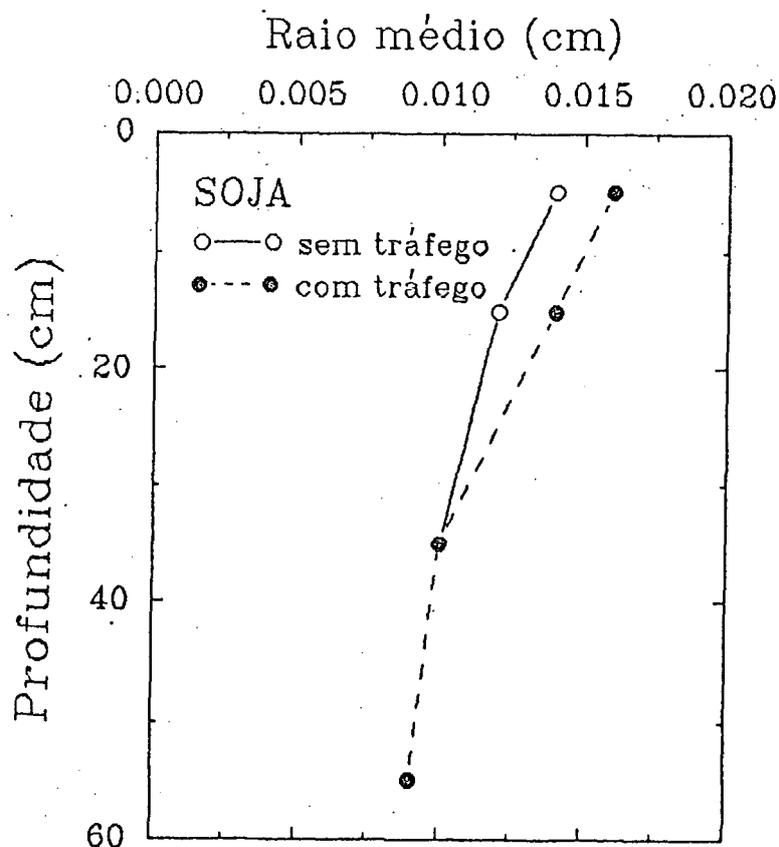


FIGURA 20 : EFEITOS DO TRÁFEGO E, DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NO RAI0 MÉDIO DE RAÍZES.

Raio médio (cm)

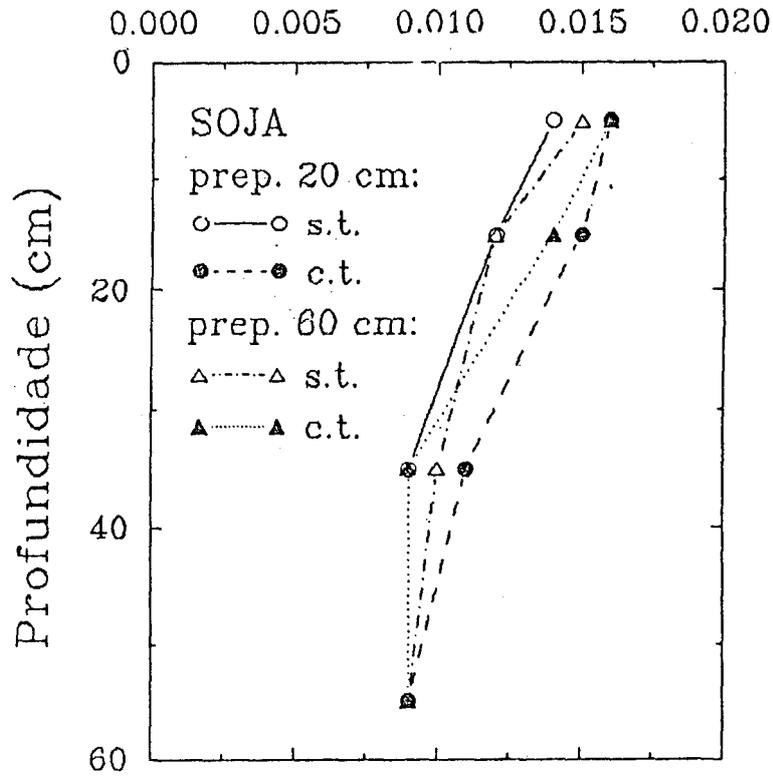


FIGURA 21 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DO TRÁFEGO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NO RAIO MÉDIO DE RAÍZES.

Raio médio (cm)

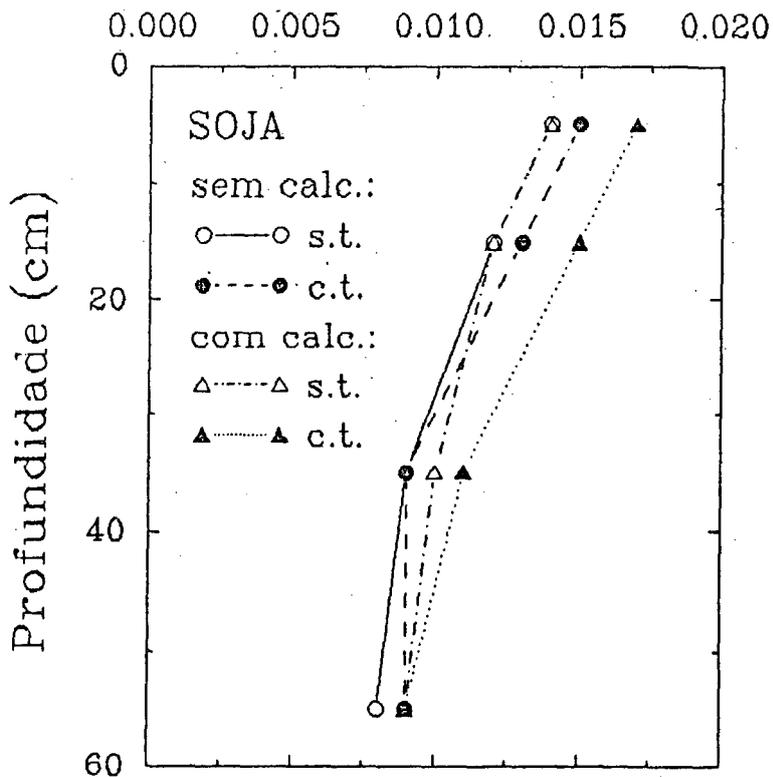


FIGURA 22 : EFEITOS DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO, DO TRÁFEGO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NO RAIO MÉDIO DE RAÍZES.

A influência dos preparos de solo e dos níveis de calcário estão mostradas na FIGURA 23. Verifica-se que não ocorreram diferenças significativas entre os tratamentos. Os valores de raio médio decresceram gradualmente com a profundidade.

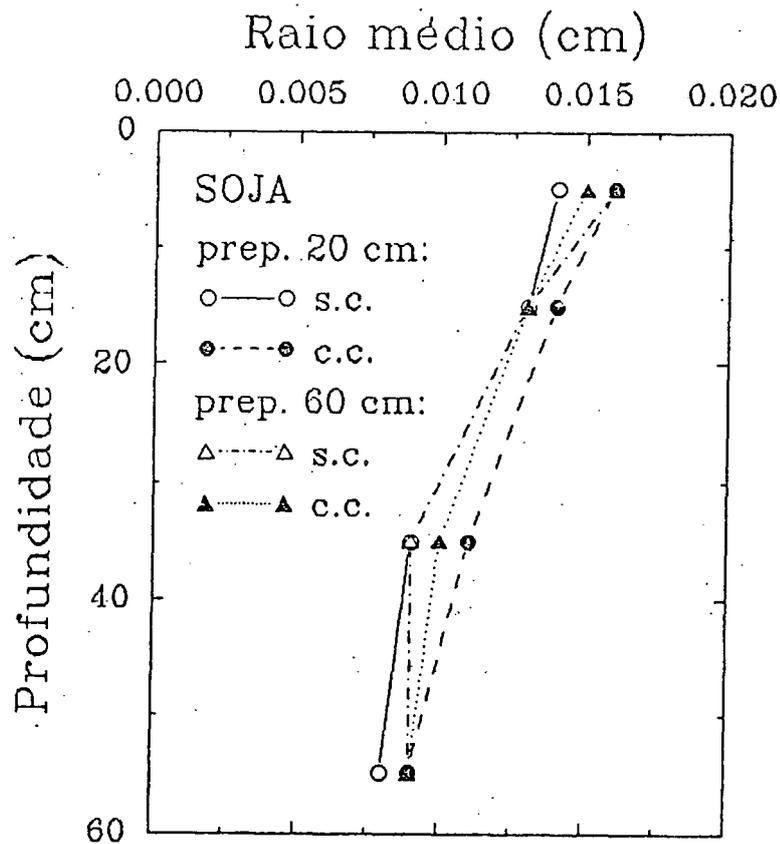


FIGURA 23 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NO RAI O MÉDIO DE RAÍZES.

Na TABELA 18, são mostrados os efeitos dos preparos de solo, dos níveis de calcário e do tráfego. Nota-se que ocorreu efeito significativo do tráfego no raio médio, no preparo de solo a 20 cm com calcário, com os maiores valores situados na linha com tráfego.

TABELA 18 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DO TRÁFEGO EM FUNÇÃO DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NO RAIÓ MÉDIO DE RAÍZES (cm) DA CULTURA DE SOJA.

Prof. (cm)	Preparo de solo (20cm)			
	S/ calcário		C/ calcário	
	Tráfego		Tráfego	
	sem	com	sem	com
0-10	0.014a	0.014a	0.014b	0.017a
10-20	0.012a	0.013a	0.012a	0.016a
30-40	0.009a	0.010a	0.010a	0.012a
50-60	0.008a	0.008a	0.009a	0.010a
	Preparo de solo (60cm)			
	S/ calcário		C/ calcário	
	Tráfego		Tráfego	
	sem	com	sem	com
0-10	0.015a	0.016a	0.014a	0.016a
10-20	0.011a	0.014a	0.012a	0.014a
30-40	0.009a	0.010a	0.010a	0.010a
50-60	0.009a	0.010a	0.009a	0.009a

Médias seguidas de mesma letra não diferem ao nível de 5% pelo teste de DUNCAN (na horizontal).

Na TABELA 19, verifica-se que ocorreu efeito significativo do tráfego no preparo de solo a 20 cm com calcário na média do preparo a 20 cm e na média dos dois preparos, com os maiores valores de raio médio situados na linha trafegada.

TABELA 19 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DO TRÁFEGO NO RAIO MÉDIO DE RAÍZES (cm) DA CULTURA DE SOJA.

Tráf. de colheita deira	Preparo de solo (20 cm)		Média	Preparo de solo (60 cm)		Média	Média
	Sem calc.	Com calc.		Sem calcári	Com calcári		
Sem	0.0108a	0.0113b	0.0111b	0.0113a	0.0114a	0.0114a	0.0112b
Com	0.0112a	0.0137a	0.0125a	0.0120a	0.0121a	0.0121a	0.0123a
Média	0.0110a	0.0125a	0.0118a	0.0117a	0.0118a	0.0117a	0.0118
Média	0.0118a			0.0117a			0.0118

Médias seguidas de mesma letra não diferem ao nível de 5% pelo teste de DUNCAN.

4.2.3. Efeitos da densidade do solo, da resistência à penetração e da porosidade de aeração na densidade de comprimento de raízes da cultura de soja

Nota-se que com o aumento da densidade do solo, o comprimento de raízes tendeu a diminuir na camada de 0-10 cm (FIGURA 24). Estes resultados estão de acordo com aqueles obtidos por, VEIHMEVER e HENDRICKSON (1948); PHILLIPS e KIRKAM (1962); SCHUURMAN (1965); BORGES et al. (1988), que verificaram restrições ao crescimento radicular com o aumento da densidade do solo. Os

valores de densidades do solo observados na camada de 0-10 cm de $1,38 \text{ g/cm}^3$, podem ser restritivos em solos de textura média e argilosa (PHILLIPS e KIRKHAM, 1962; BORGES et al., 1988). Com a profundidade, a densidade do solo não influenciou de forma significativa o comprimento radicular nas camadas abaixo de 10 cm.

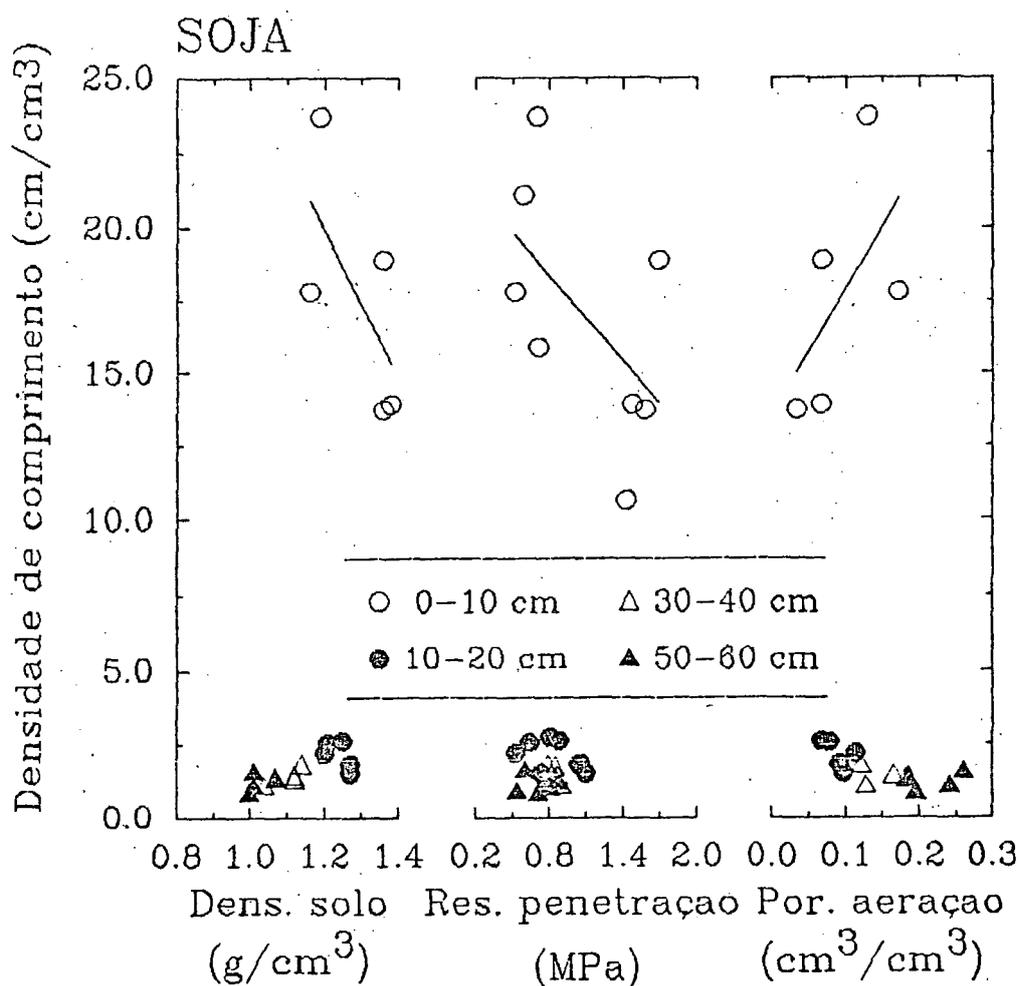


FIGURA 24 : EFEITOS DA DENSIDADE DO SOLO, DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO E DA POROSIDADE DE AERAÇÃO NA DENSIDADE DE COMPRIMENTO DE RAÍZES.

A resistência à penetração influenciou negativamente o comprimento de raízes na camada de 0-10 cm (FIGURA 24). O comprimento radicular apresentou decréscimo com o aumento da resistência à penetração. Vários autores verificaram este efeito (TAYLOR e BURNETT, 1964; TAYLOR et al., 1966; BOONE e VEEN, 1982; CINTRA e MIELNICZUK, 1983; PEDÓ, 1986). A ocorrência de valores de resistência à penetração de até 1,69 MPa, demonstra a existência de condições impeditivas ao crescimento de raízes (BOONE e VEEN, 1982; ORTOLANI et al., 1982; CINTRA e MIELNICZUK, 1983; PEDÓ, 1986). Em função da profundidade, após a camada de 0-10 cm, a resistência à penetração não influenciou significativamente o comprimento de raízes.

Nota-se que a porosidade de aeração influenciou negativamente o comprimento de raízes na camada de 0-10 cm (FIGURA 24). Houve diminuição do comprimento radicular em função da diminuição da porosidade de aeração. É possível verificar a ocorrência de valores de porosidade de aeração inferiores a $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, que são considerados críticos (VOMOCIL e FLOCKER, 1961; GRABLE e SIEMER, 1968; NYE e TINKER, 1977; DEXTER, 1988). A porosidade de aeração a partir da camada de 0-10 cm não influenciou significativamente o comprimento de raízes.

4.2.4. Produtividade

Os efeitos dos preparos de solo, dos níveis de calcário e do tráfego na produtividade da cultura de soja foram avaliados pelo teste t (STUDENT) e estão mostrados na TABELA 20. Verifica-se que

não ocorreu efeitos significativos dos tratamentos. Porém, considerando-se o nível de significância a 10% de probabilidade, nota-se que ocorreu diferenças entre os níveis de tráfego, mostrando o efeito negativo da compactação proveniente da colheitadeira na produtividade.

TABELA 20 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DO TRÁFEGO (SIGNIFICÂNCIA DO TESTE t) NA PRODUTIVIDADE DA CULTURA DE SOJA (t/ha) NO ANO AGRÍCOLA DE 90/91.

Tratamentos	Sem tráfego	Com tráfego	Média
Prep. 20cm (sem calc.)	4287a	3312a	3873a
Prep. 20cm (com calc.)	4073a	3821a	
Prep. 60cm (sem calc.)	3699a	3660a	3865a
Prep. 60cm (com calc.)	4098a	4008a	
Média	4039a#	3699a#	

(médias de três valores).

Médias seguidas de mesma letra não diferem ao nível de 5%.

Diferença com nível de significância a 10% de probabilidade.

Como foi considerado no item 4.1.6, a ausência de diferença entre os preparos de solo nas condições do experimento, não justifica economicamente a utilização do preparo de solo a 60 cm. A falta de diferenças entre os níveis de calcário, leva a crer que as condições químicas de solo no nível sem calcário não foram impeditivas.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÃO

- Os preparos de solo e os níveis de calcário não influenciaram significativamente o desenvolvimento radicular e o rendimento das culturas.

- Houve tendência para o rendimento da cultura de milho ser maior no preparo de solo a 20 cm.

- Houve tendência para o rendimento da cultura de soja ser maior onde não houve tráfego.

- O efeito do tráfego ficou confinado à camada de 0-10 cm, causando aumento da resistência à penetração, da densidade do solo e diminuição da porosidade de aeração. Em consequência, a densidade de massa seca e a densidade de comprimento de raízes da cultura de soja diminuíram e o raio médio aumentou.

- Houve tendência do preparo de solo a 60 cm ser mais sensível ao tráfego.

- As distâncias e as profundidades de amostragem da planta influenciaram significativamente os parâmetros radiculares avaliados, de forma que com o aumento de ambas, houve diminuição da densidade de massa seca, da densidade de comprimento e do raio médio de raízes.

- O método do trado se mostrou pouco sensível para detectar as possíveis diferenças entre os tratamentos.

- Recomenda-se a realização de pesquisas em métodos para a caracterização do sistema radicular que detectem pequenas diferenças e que possam ser utilizados em estudos de longo prazo, em função dos danos que causam às parcelas experimentais.

6. ANEXO I

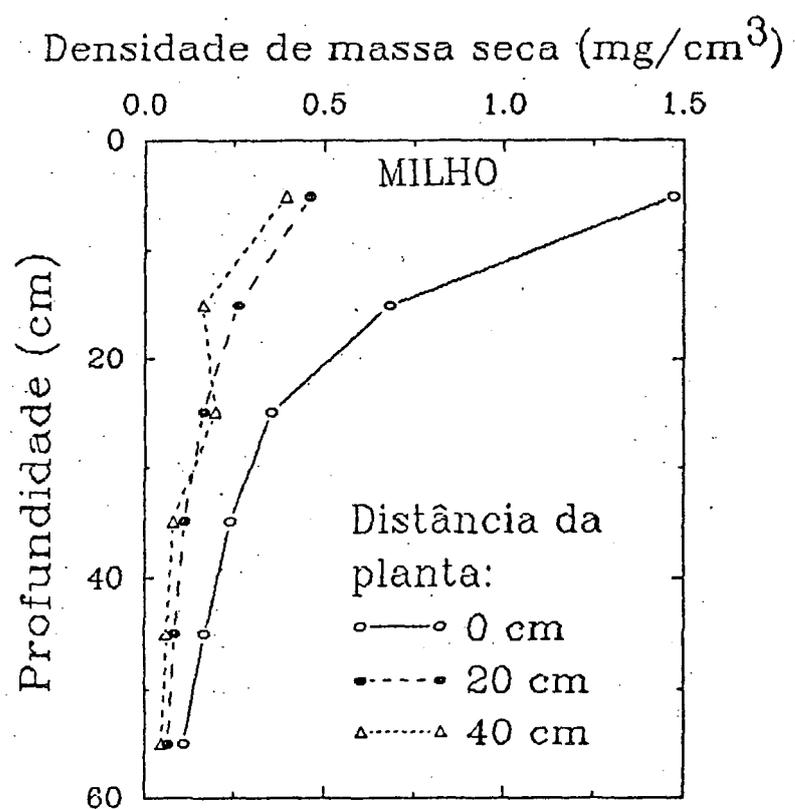


FIGURA I.1 : EFEITOS DAS DISTANCIAS E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE MASSA SECA DE RAIZES.

TABELA I.1 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS DISTÂNCIAS DE AMOSTRAGEM EM FUNÇÃO DAS PROFUNDIDADES NA DENSIDADE DE MASSA SECA DE RAÍZES (mg/cm^3) DA CULTURA DE MILHO.

Prof. (cm)	Preparo de solo (20cm)					
	Sem Calcário			Com Calcário		
	Distância da planta (cm)			Distância da planta (cm)		
	0 (linha)	20 (entrel)	40 (entrel)	0 (linha)	20 (entrel)	40 (entrel)
0-10	1,406a	0,427b	0,339b	1,425a	0,360b	0,309b
10-20	0,936a	0,400b	0,114b	0,828a	0,254b	0,245b
20-30	0,311a	0,269a	0,104a	0,374a	0,188a	0,107a
30-40	0,254a	0,096a	0,061a	0,189a	0,144a	0,091a
40-50	0,114a	0,076a	0,054a	0,193a	0,118a	0,095a
50-60	0,116a	0,062a	0,032a	0,137a	0,091a	0,089a
	Preparo de solo (60cm)					
	Sem Calcário			Com Calcário		
	Distância da planta (cm)			Distância da planta (cm)		
	0 (linha)	20 (entrel)	40 (entrel)	0 (linha)	20 (entrel)	40 (entrel)
0-10	1,551a	0,360b	0,418b	1,501a	0,507b	0,412b
10-20	0,582a	0,270ab	0,140b	0,389a	0,150a	0,126a
20-30	0,383a	0,165a	0,095a	0,342a	0,120a	0,089a
30-40	0,351a	0,133a	0,093a	0,162a	0,078a	0,077a
40-50	0,249a	0,051a	0,046a	0,119a	0,098a	0,058a
50-60	0,107a	0,052a	0,043a	0,075a	0,067a	0,046a

Médias seguidas de mesma letra não diferem ao nível de 5% pelo teste de DUNCAN (na horizontal).

TABELA I.2 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS DISTÂNCIAS DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE MASSA SECA DE RAIZES (mg/cm^3) DA CULTURA DE MILHO.

Distância da planta (cm)	Prep. de solo (20 cm)		Média	Prep. de solo (60 cm)		Média	Média de preparos
	Sem calc.	Com calc.		Sem calc.	Com calc.		
(0) linha	0,523a	0,525a	0,524a	0,537a	0,432a	0,484a	0,504a
(20) entrel.	0,222b	0,178b	0,200b	0,217b	0,155b	0,184b	0,192b
(40) entrel.	0,117b	0,166b	0,142b	0,141b	0,150b	0,148b	0,145b
Média	0,287a	0,290a	0,289a	0,298a	0,246a	0,272a	0,280a
Média	0,289a			0,272a			0,280

Médias seguidas de mesma letra não diferem ao nível de 5% pelo teste de DUNCAN.

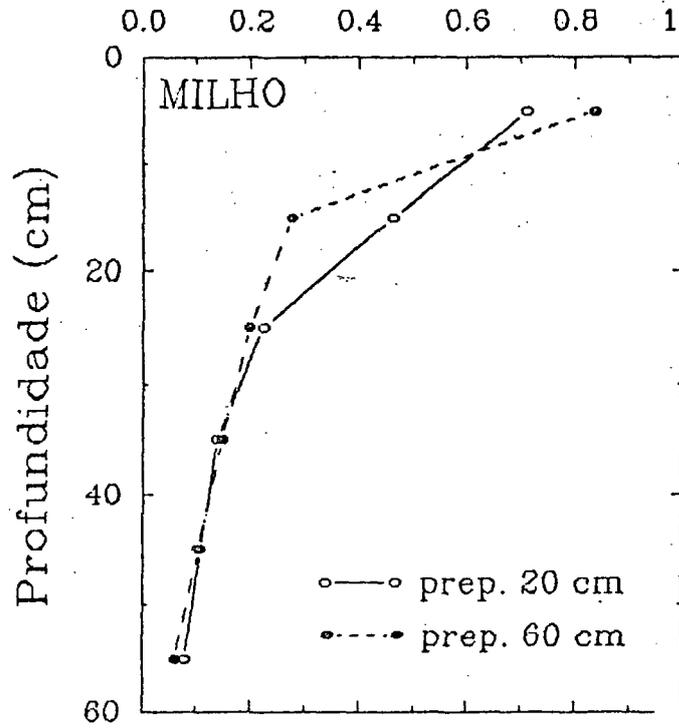


FIGURA 1.2 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE MASSA SECA DE RAÍZES.

Densidade de massa seca (mg/cm^3)

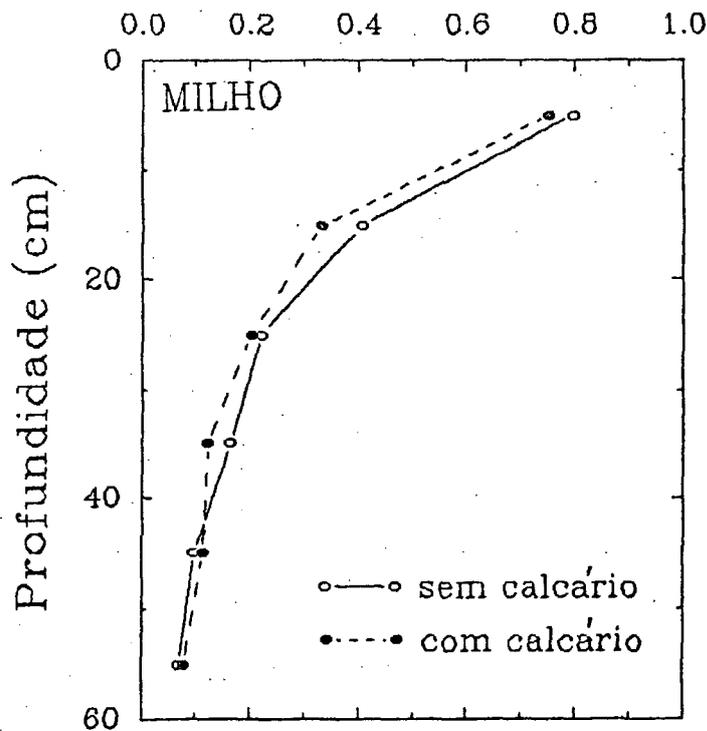


FIGURA 1.3 : EFEITOS DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE MASSA SECA DE RAÍZES.

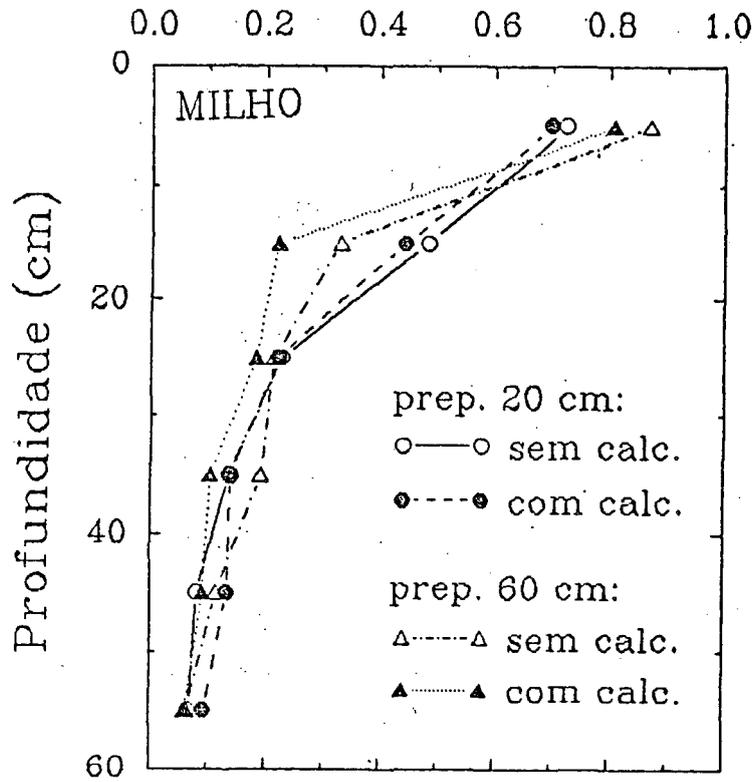


FIGURA I.4 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS PROFUNDIDADES NA DENSIDADE DE MASSA SECA DE RAÍZES.

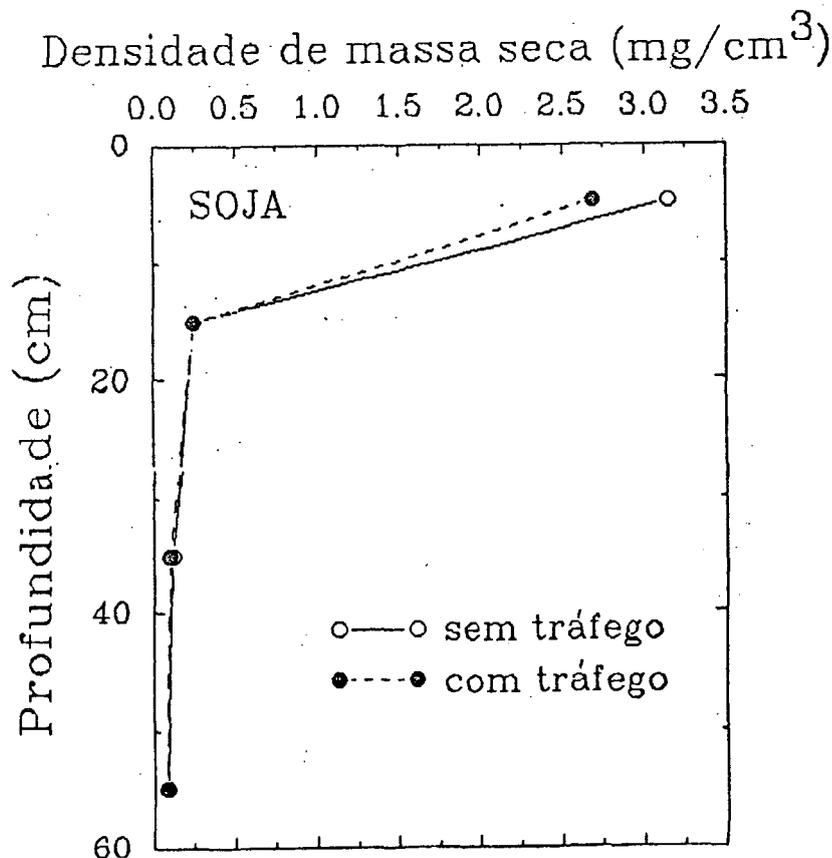


FIGURA I.5 : EFEITOS DO TRÁFEGO E DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE MASSA SECA DE RAÍZES.

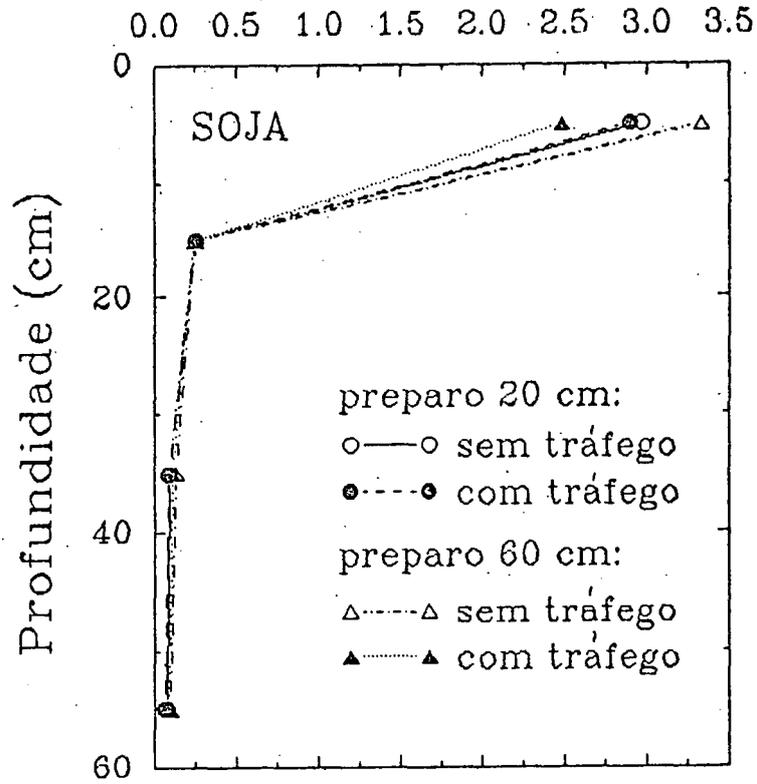


FIGURA I.6 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DO TRÁFEGO E DAS PROFUNDIDADES NA DENSIDADE DE MASSA SECA DE RAÍZES.

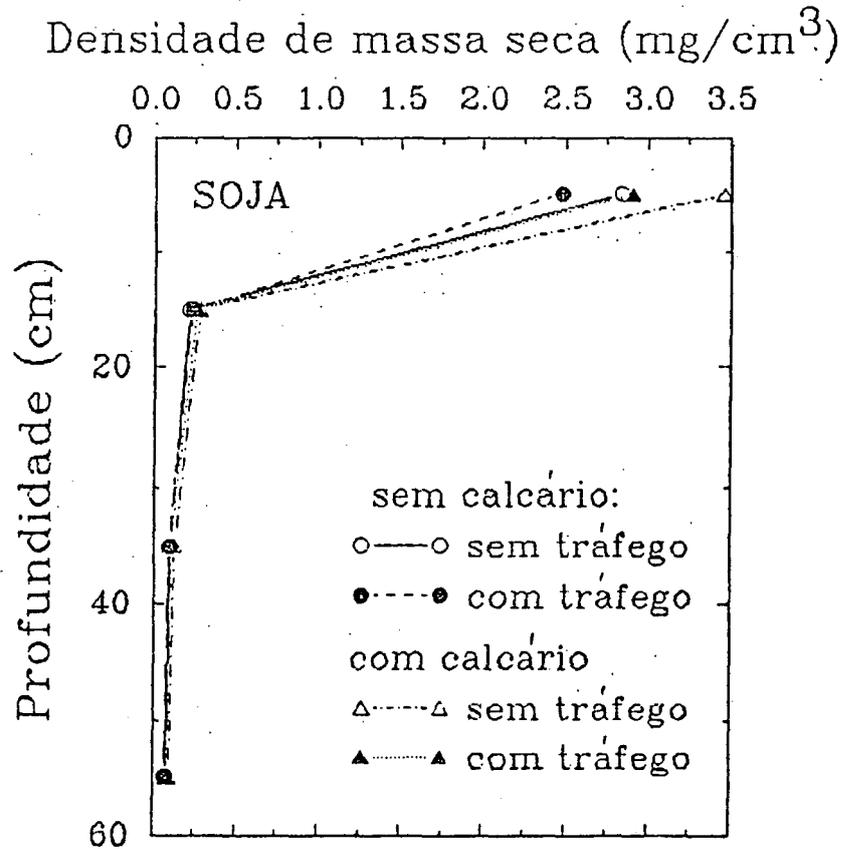


FIGURA I.7 : EFEITOS DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO, DO TRÁFEGO E DAS PROFUNDIDADES NA DENSIDADE DE MASSA SECA DE RAÍZES.

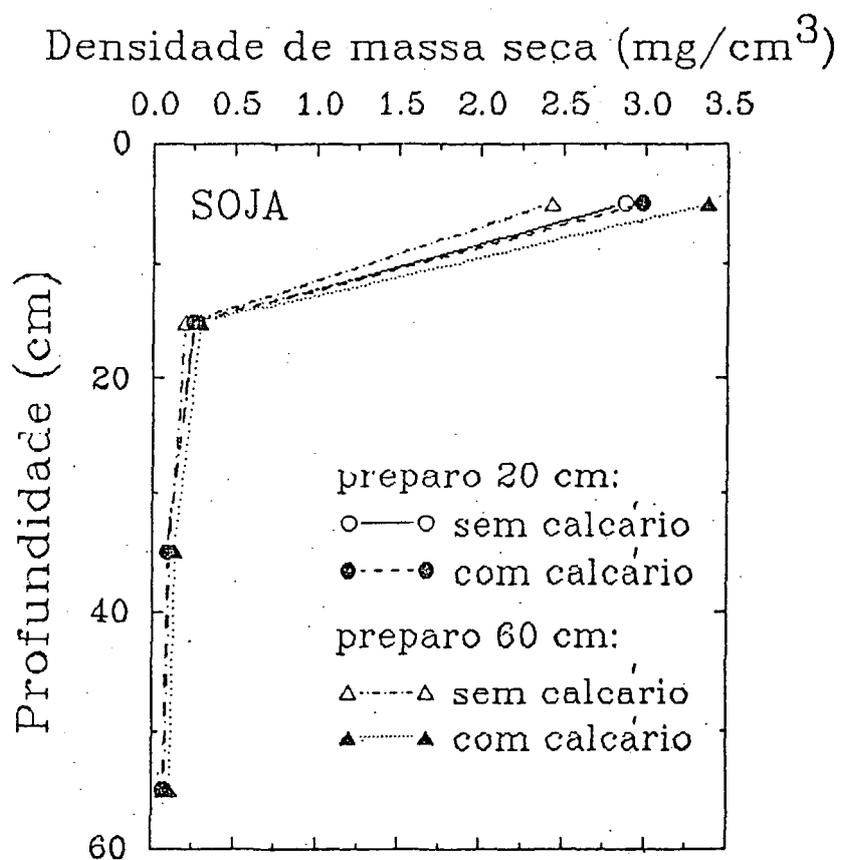


FIGURA I.8 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DAS PROFUNDIDADES NA MASSA SECA DE RAÍZES.

TABELA I.3 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DO TRÁFEGO EM FUNÇÃO DAS PROFUNDIDADES DE AMOSTRAGEM NA DENSIDADE DE MASSA SECA DE RAÍZES (cm^3/cm^3) DA CULTURA DE SOJA.

Profundidade (cm)	Preparo de solo (20cm)			
	S/ calcário		C/ calcário	
	Tráfego		Tráfego	
	sem	com	sem	com
0-10	3.045a	2.716a	2.898a	3.078a
10-20	0.273a	0.236a	0.225a	0.279a
30-40	0.099a	0.089a	0.100a	0.092a
50-60	0.092a	0.060a	0.071a	0.068a
	Preparo de solo (60cm)			
	S/ calcário		C/ calcário	
	Tráfego		Tráfego	
	sem	com	sem	com
0-10	2.630a	2.237a	4.033a	2.730b
10-20	0.166a	0.238a	0.336a	0.250a
30-40	0.109a	0.108a	0.159a	0.117a
50-60	0.068a	0.090a	0.125a	0.099a

Médias seguidas de mesma letra não diferem ao nível de 5% pelo teste de DUNCAN (na horizontal).

TABELA I.4 : EFEITOS DOS PREPAROS DE SOLO, DOS NÍVEIS DE CALCÁRIO E DO TRAFEGO NA DENSIDADE DE MASSA SECA DE RAÍZES (cmg/cm^3) DA CULTURA DE SOJA.

Tráf. de colheita deira	Prep. de solo (20 cm)		Média	Preparo de solo (20 cm)		Média	Média
	Sem calc.	Com calc.		Sem calcário	Com calcário		
Sem	0.877a	0.821a	0.849a	0.743a	1.163a	0.953a	0.901a
Com	0.775a	0.879a	0.827a	0.668a	0.799b	0.734a	0.781a
Média	0.826a	0.850a	0.838a	0.706a	0.981a	0.843a	0.841
Média	0.838a			0.843a			0.841

Médias seguidas de mesma letra não diferem ao nível de 5% pelo teste de DUNCAN.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) AUBERTIN, G. M.; KARDOS, L. T. Root growth through porous media under controlled conditions. I. Effect of pore size and rigidity. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 29, p. 290-293, 1965.
- 2) BALL, B. C. Modelling of soil pores as tubes using gas permeabilities, gas diffusivities and water release. Journal of Soil Science, London, v. 32, p. 465-481, 1981.
- 3) BAR-YOSEF, B.; LAMBERT, J. R. Corn and cotton root growth in response to soil impedance and water potential. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 45, p. 930-935, 1981.
- 4) BARBER, S. A. Growth and nutrient uptake of soybean roots under field conditions. Agronomy Journal, Madison, v. 70, p. 457-461, 1978.
- 5) BARBER, S. A. Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach. New York: J. Wiley, 1984. 398p.
- 6) BARLEY, K. F.; GREACEN, E. L. Mechanical resistance as a soil factor influencing the growth of roots and underground shoots. Advances in Agronomy, New York, v. 19, p. 1-43, 1967.
- 7) BARLEY, K. F. Mechanical resistance of the soil the soil in relation to the growth of roots and emerging shoots. Agrochimica, Piza, v. 20, p. 173-182, 1976.
- 8) BARLEY, K. F. The effects of mechanical stress on the growth of roots. Journal of Experimental Botany, Oxford, v. 13, n. 37, p. 95-110, 1962.

- 9) BARRETO, A. C. Efeito de sistemas de rotação, sucessão e níveis de calagem, sobre características e químicas do solo e no desenvolvimento do sistema radicular e produção de grãos de milho (*Zea mays* L). Piracicaba, 1991. 154f. Tese (Doutorado em Agronomia, Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- 10) BAUDER, J. W.; RANDALL, G. W.; SWAN, J. B. Effect of four continuous tillage system on mechanical impedance of a clay loam soil. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 45, p. 802-806, 1981.
- 11) BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. Journal of Soil Science, London, v. 41, p. 341-358, 1990.
- 12) BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. Methods of soil analysis, physical, chemical and mineralogical methods. Madison: America Society of Agronomy, 1986. p. 363-375.
- 13) BLANCHAR, R. W.; EDMONDS, C. R.; BRADFORD, J. M. Root growth in cores formed from fragipan and B₂ horizons of Hobson soil. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 42, p. 437-440, 1978.
- 14) BOHM, W. Methods of studying root systems. Berlim: Springer Verlag, 1979. 189p.
- 15) BOHM, W.; MADUAKOR, H.; TAYLOR, H. M. Comparison of five methods for characterizing soybean rooting density and development. Agronomy Journal, Madison, v. 69, p. 415-419, 1977.

- 16) BOONE, F. R. et al. Soil structure. In: BOONE, F. R. Experiences with there tillage systems an a Marine Loam Soil. II. 1976-1979. Pudoc, Wageningen, Agricultural Research Reports, 1984. n. 925, p. 24-46.
- 17) BOONE, F. R. Weather and other environmental factors influencing crop responses to tillage and traffic. Soil & Tillage Research, Amsterdam, v. 11, p. 283-324, 1988.
- 18) BOONE, F. R.; VEEN, B. W. The influence of mechanical resistance and phosphate supply on morphology and function of maize roots. Netherlands Journal Agricultural Science, Amsterdam, v. 30, p. 179-192, 1982.
- 19) BORGES, E. N.; NOVAIS, R. F. de; REGAZZI, A. J.; FERNANDES, B.; BARROS, N. F. de. Respostas de variedades de soja à compactação de camadas de solo. Revista Ceres, Viçosa, v. 35, n. 202, p. 553-568, 1988.
- 20) BRADFORD, I. M. Penetrability. In: KLUTE, A. Methods of soil analisys, physical, chemical and mineralogical methods. Madison: America Society of Agronomy, 1986.
- 21) BRILL, G. D.; ALDERFER, R. B.; HANNA, W. J. Effects of subsoiling and deep placement of fertilizer on a Coastal Plain Soil and vegetables. Agronomy Journal, Madison, v. 57, p. 201-204, 1965.
- 22) BROWN, D. A.; SCOTT, H. D. Dependence of crop growth and yield on root development and activity. In: BARBER, S.Q.; BOULDIN, D.R. Roots nutrient and water influx, and plant growth. Madison: Soil Science Society of America, Crop Science Society of America, American Society of Agronomy, 1984. p. 101-137. (QSQ Special Publication; n. 49).

- 23) BURNETT, E. Profile modification for improved water intake and storage. Great Plains Agr. Council Publ., v. 34, p. 59-63, 1969.
- 24) CALLOT, G; CHAMAYOU, H.; MAERTENS, C.; SALSAC, L. et al. Mieux comprendre les interactions sol-racine: incidence sur la nutrition minerale. Paris: Institut National de la Recher-che Agronomique, 1982. p. 325.
- 25) CAMPBELL, R. B.; REICOSKY, D. C.; DOTY, C. W. Physical properties and tillage of Paleudults in the southeastern Coastal Plains. Journal of Soil Water Conservation, Ankeny, v. 29, p. 220-224, 1974.
- 26) CANNEL, Q. R.; JACKSON, M. B. Alleviating aeration stress. In: ARKIN, G. F.; TAYLOR, G. M. Modifying the root environment to reduce crop stresses. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1981. p. 141-180.
- 27) CANNON, W. A. Physiological features of roots with special reference to the relations of roots to aeration of the soil. Publs Carnegie Instn, v. 368, p. 1-168, 1925.
- 28) CARVALHO, L. J. C. B. de; SOUZA, D. M. G. de; GOMIDE, R. L.; RODRIGUES, G. C. Efeito do gesso na produçãõ de grãos e parâmetros fisiológicos. In: Relatório técnico anual do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, 1982-1985. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1987. p. 263-269.
- 29) CASSEL, D. K. Effects of plowing depth and deep incorporation of lime and phosphorus upon physical and chemical properties of two Coastal Plain Soils after 15 years. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 44, p. 89-95, 1980.

- 30) CASSEL, D. K.; BOWEN, H. D.; NELSON, L. A. An evaluation of mechanical impedance for three tillage treatments on Norfolk sandy loam. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 42, p. 116-120, 1978.
- 31) CASTRO, O. M.; VIEIRA, S. R.; MARIA, I. C. Sistemas de preparo do solo e disponibilidade de água. In: SIMPÓSIO SOBRE O MANEJO DE ÁGUA NA AGRICULTURA. Anais. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 27-51.
- 32) CINTRA, F. L. D. Caracterização do impedimento mecânico em Latossolos do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1983. 89f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- 33) CINTRA, F. L. D.; MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 7, p. 197-201, 1983.
- 34) CINTRA, F. L. D.; MIELNICZUK, J.; SCOPEL, I. Caracterização do impedimento mecânico em um Latossolo Roxo do Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas,
- 35) CURRIE, J. A. Gas diffusion through soil crumbs: the effect of compaction and wetting. Journal of Soil Science, London, v. 35, p. 1-10, 1984.
- 36) CURRIE, J. Q. Gaseous diffusion in the aeration of aggregated soils. Soil Science, Baltimore, v. 92, p. 40-45, 1961.

- 37) DANIELSON, R. E.; SUTHERLAND, P. L. Porosity In: KLUTE, A. Methods of soil analysis, physical and mineralogical methods. Madison: America Society of Agronomy, 1982. p. 443-461.
- 38) De JONG, E.; DOUGLAS, J. T.; GOSS, M. J. Gaseous difusion in shrinking soils. Soil Science, Baltimore, v. 136 p. 10-17, 1983.
- 39) DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. Soil & Tillage Rescarch, Amsterdam, v. 11, p. 199-238, 1988.
- 40) DREW, M. C.; SAKER, L. R. Assessment of a rapid method, using soil cores, for estimating the amount and distribution of roots in the field. Plant and Soil, The Hague, v. 55, p. 297-305, 1980.
- 41) EAVIS, B. W.; PAYNE, D. Soil physical conditions and root growth. In: WHITTINGTON, W. J. Root growth. London: Butterworths, 1969. p. 315-336.
- 42) ECK, F. V.; UNGER, P. W. Soil profile modification for increasing crop production. Advances in Soil Sciences, New York, v. 1, p. 65-100, 1985.
- 43) ECK, H. V.; DAVIS, R. G. Profile modification and root yield, distribution, and activity. Agronomy Journal, Madison, v. 63, p. 934-937, 1971.
- 44) ECK, H. V.; TAYLOR, H. M. Profile modification of a slowly permeable soil. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 33, p. 779-783, 1969.
- 45) EHLERS, W. et al. Flow resitance in soil and plant during field growth of oats. Geoderma, Amsterdan, v. 25, p. 1-12, 1981.

- 46) EHLERS, W.; KOPKE, U.; HESSE, F.; BOHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled Loess soil. Soil & Tillage Research, Amsterdam, v. 3, p. 261-275, 1983.
- 47) EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro, 1979. não paginado.
- 48) ENGELBERT, L. E.; TRUOG, E. Crop response to deep tillage with lime and fertilizer. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 20, p. 50-54, 1956.
- 49) FEHRENBACHER, J. B.; SNIDER, H. J. Corn root penetration in Muscatine, Elliott and Cisne soils. Soil Science, Baltimore, v. 77, p. 281-291, 1954.
- 50) FOY, C. D. Effects of aluminum on plant growth. In: CARSON, E. W. The plant root and its environment. Charlottesville: University Press of Virginia, 1974. p. 601-642.
- 51) FOY, C. D. Physiological effects of hydrogen, aluminum, and manganese toxicities in acid soils. In: ADAMS, F. Soil acidity and liming, 2nd. ed. Madison: Soil Science of America, 1984. p. 57-97.
- 52) FREITAS, P. L. Effects of soil structure on root growth and function. Cornell, 1988. 213f. Thesis (Doctor of Philosophy) - Faculty of the Graduate School of Cornell University.
- 53) FURLANI, R. R. Efeitos fisiológicos do alumínio em plantas. In: SIMPÓSIO AVANÇADO DE SOLOS E NUTRIÇÃO DE PLANTAS. Campinas: Fundação Cargill, 1989. p. 73-90.

- 54) GERARD, C. J.; MEHTA, H. C.; HINOJOSA, F. Root growth in a clay soil. Soil Science, Baltimore, v. 114, p. 37-49, 1972.
- 55) GERIK T. J.; MORRISON Jr., J. E.; CHICHESTER, F. W. Effects of controlled - traffic on soil physical properties and crop rooting. Agronomy Journal, Madison, v. 79, p. 434-438, 1987.
- 56) GILL, W. R.; BOLT, G. H. Pfeffer's studies of the root growth pressures exerted by plants. Agronomy Journal, Madison, v. 47, p. 166-168, 1955.
- 57) GILL, W. R.; MILLER, R. D. A method for study of the influence of mechanical impedance and aeration on the growth of seedling roots. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 20, p. 154-157, 1956.
- 58) GILL, W. R.; VANDEN BERG, G. E. Soil dynamics in tillage and tractor. Washington, D. C.: Department of Agriculture, 1968. 511p. (Agriculture Handbook; n. 316).
- 59) GODOY, H.; CORREA, A. R.; SANTOS, D. Clima do Paraná. Manual agropecuário para o Paraná. Londrina; Fundação Instituto Agronômico do Paraná, 1976.
- 60) GOSS, M. J. Effects of mechanical impedance on root growth in barley (Hordeum vulgare L.). I. Effects on elongation and branching of seminal roots. Journal of Experimental Botany, Oxford, v. 28, p. 96-111, 1977.
- 61) GOSS, M. J.; RUSSEL, R. S. Effects of mechanical impedance on root growth in barley (Hordeum vulgare L.). III. Observations on the mechanism of response. Journal of Experimental Botany, Oxford, v. 31, p. 577-588, 1980.

- 62) GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials, and elongation of corn roots. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 32, p. 180-186, 1968.
- 63) GREACEN, E. L.; BARLEY, K. P.; FARREL, D. A. The mechanics of root growth in soils with particular reference to the implications for root distribution. In: WHITTINGTON, W. J. Root growth. London: Butterworths, 1969. p. 256-269.
- 64) GREACEN, E. L.; FARREL, D. A.; COCKROFT, B. Soil resistance to metal probes and plant roots. In: Transactions 9th International Congress Soil Science, Adelaide, v. 1, p. 769-779, 1968.
- 65) GREACEN, E. L.; OH, J. S. Physics of root growth. Nature, Londres, v. 235, p. 24-25, 1972.
- 66) GREENLAND, D. J. Soil damage by intensive arable cultivation: temporary or permanent? Phil. Trans. Royal Soc. Lond. B., v. 281, p. 193-208, 1977.
- 67) GREENWOOD, D. J. Effect of oxygen distribution in the soil on plant growth. In: WHITTINGTON, W. J. Root growth. London: Butterworths, 1969. p. 202-221.
- 68) GROENEVELT, P. H.; KAY, B. D.; GRANT, C. D. Physical assesment of a soil with respect to rooting potential. Geoderma, Amsterdam, v. 34, p. 101-114, 1984.
- 69) GROHMANN, F.; QUEIROZ NETO, J. P. Efeito da compactação artificial de dois solos limo-argilosos sobre a penetração das raízes de arroz. Bragantia, Campinas, v. 25, p. 421-431, 1966.

- 70) HAMBLIN, A. P. The influence of soil structure on water movement, crop root growth, and water uptake. Advances in Agronomy, New York, v. 38, p. 95-157, 1985.
- 71) HAYNES, R. J. Lime and phosphate in the soil-plant system. Advances in Agronomy, New York, v. 37, p. 249-315, 1984.
- 72) HEMSATH, D. L.; MAZURAK, A. P. Seedling growth of sorghum in clay-sand mixtures at various compactions and water contents. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v.38, p. 387-390, 1974.
- 73) HOBBS, J. A. et al. Agronomy Journal, Madison, v. 53, p. 313-316, 1961.
- 74) HOWARD, D. D.; ADAMS, F. Calcium requirements for penetration of subsoils by primary cotton roots. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 29, p. 558-562, 1965.
- 75) HUCK, M. G. Variation in tap root elongation rate as influenced by composition of soil air. Agronomy Journal, Madison, v. 62, p. 815-818, 1970.
- 76) JAMISON, V. C.; THORNTON, J. F. Results of deep fertilization and subsoiling on a clay pan soil. Agronomy Journal, Madison, v. 52, p. 193-195, 1960.
- 77) JONES, C. A. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 47, p. 1208-1211, 1983.
- 78) KASPAR, T. C.; BROWN, H. J.; KASSMEYER, E. M. Corn root distribution as affected by tillage, wheel traffic, and fertilizer placement. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 55, p. 1390-1394, 1991.

- 79) KAYS, S. J.; NICKLOW, C. W.; SIMONS, D. H. Ethylene in relation to the response of roots to physical impedance. Plant and Soil, The Hague, v. 40, p. 565-571, 1974.
- 80) KAWASAKI, H.; IWATA, F.; MESQUITA FILHO, M. V. de. cerrados. In: Relatório parcial do projeto da cooperação em pesquisa agrícola nos cerrados do Brasil, 1978-1990. Planaltina: EMBRAPA-CFAC-JICA, 1980. p. 157-173.
- 81) KESER, M.; NEUBAUER, B. F.; HUTCHINSON, F. E. Influence of aluminum ions on developmental morphology of sugarbeet roots. Agronomy Journal, Madison, v. 67, p. 84-88, 1975.
- 82) KLEPPER, B.; TAYLOR, H. M.; HUCK, M. G.; FISCUS, E. L. Water relations and growth of cotton in drying soil. Agronomy Journal, Madison, v. 65, p. 307-310, 1973.
- 83) KÖPKE, U. Methods for studying root growth. In: RUSSEL, R. S.; IGUE, Y. R. The soil/root system in relation to brazilian agriculture. Londrina: Fundação Instituto Agronômico do Paraná, 1981, p. 303-318.
- 84) LAL, R. No-tillage effects on soil properties under different crops in Western Nigeria. Soil Science Society of America Journal, Madison, p. 762-768, 1976.
- 85) LARSON, W. E.; LOVELY, W. G.; PESEK, J. T.; BURWELL, R. R. Effect of subsoiling and deep fertilizer placements on yeild of corn in Iowa and Illinois. Agronomy Journal, Madison, v. 52. p. 185-189, 1960.
- 86) LINDBERG, S.; PETERSSON, S. Effects of mechanical stress on uptake and distribution of nutrients in barley. Plant and Soil. The Hague, v. 83, p. 295-309, 1985.

- 87) MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989. 201p.
- 88) MAURYA, P. R.; LAL, R. Effects of no-tillage and ploughing on roots of maize and leguminous crops. Experimental Agricultural, New York, v. 16, p. 185-193, 1980.
- 89) MENGEL, D. B.; BARBER, S. A. Rate of nutrient uptake per unit of corn root under field conditions. Agronomy Journal, Madison, v. 56, n. 4, p. 399-402, 1974.
- 90) MEREDITH, H. L.; PATRICK, W. H. Effects of soil compaction on subsoil root penetration and physical properties of three soils in Louisiana. Agronomy Journal, Madison, v. 53, p. 163-167, 1961.
- 91) MIRREH, H. F.; KETCHESON, J. W. Influence of soil bulk density and matric pressure on soil resistance to penetration. Canadian Journal of Soil Science, Ottawa, v. 52, p. 477-483, 1972.
- 92) MISRA, R. K.; DEXTER, A. R.; ALLSTON, A. M. Maximum axial and radial growth pressure of plant roots. Plant and Soil, The Hague, v. 98, p. 315-326, 1986.
- 93) MITCHELL, R. L.; RUSSEL, W. J. Root development and rooting patterns of soybean (Glycine max (L.) Merrill) evaluated under field conditions. Agronomy Journal, Madison, v. 63, p. 313-316, 1971.
- 94) MUSICK, J. T.; DUSECK, D. A. Deep tillage of graded-furrow irrigated Pullman clay loam-a long-term evaluation. Transactions of the American Society Agricultural Engineers, St. Joseph, v. 18, p. 263-269, 1975.

- 95) NESMITH, D. S. et al. Soil Compaction in double - cropped wheat and soybeans on a ultisol. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 51, p. 183-186, 1987.
- 96) NOORDWIJK, M. Van; FLORIS, J.; DE JAGER, A. Sampling schemes for estimating root density distribution in cropped fields. Netherlands Journal of Agricultural Science, Amsterdam, v. 33, p. 241-262, 1985.
- 97) NYE, P. H.; TINKER, P. B. Solute movement in the soil-root system. Osney Mead: Black-Well Scientific Publications, 1977. 342P.
- 98) OLIVEIRA, E. F. de. Efeito do preparo do solo com e sem queima de resíduos de trigo (*Triticum aestivum*) sobre as condições físicas de um Latossolo. Porto Alegre, 1985. 142f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- 99) OLIVEIRA, E. F. de. Efeito do sistema de preparo do solo nas suas características físicas e químicas e no rendimento de trigo e soja em Latossolo Roxo. Cascavel: OCEPAR, 1990. 54p. (OCEPAR. Resultados de Pesquisa; n. 4).
- 100) OLIVEIRA, L. B. de et al. Caracterização de adensamento no subsolo de uma área de tabuleiro da estação experimental do curado, Recife. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 3, p. 207-214, 1968.
- 101) OLIVEIRA, L. B. de. O estudo físico do solo e a aplicação racional de técnicas conservacionistas. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 2, p. 281-285, 1967.

- 102) ORTOLANI, A. F.; COAN, O.; SALLES, H. C. Influência da compactação do solo no desenvolvimento da soja (Glycine max (L) Merrill). Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 6, n. 1, p. 35-42, 1982.
- 103) PEARSOON, R. W. Soil environment and root development. In: PIERRE, W. G.; KIRKHAM, D.; PESEK, D.; SHAW, R. Environment and efficient water use. 4th. ed. Madison: American Society of Agronomy and Soil Science of America, 1986. p. 95-126.
- 104) PEDÓ, V. Rendimento e distribuição de raízes de seis espécies de plantas em dois níveis de compactação do solo. Porto Alegre: 1986. 92f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- 105) PHILLIPS, R. G.; KIRKHAM, D. Mechanical impedance and corn seedling root growth. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 26, p. 319-322, 1962.
- 106) PRATRICK, W. H.; SLOANE, L. W.; PHILLIPS, S. A. Response of cotton and corn to deep placement of fertilizer and deep tillage. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 23, p. 307-310, 1959.
- 107) RASMUSSEN, W. W.; MOORE, D. P.; ALBAN, L. A. Improvement of a solonetzic (slick spot) soil by deep plowing, subsoiling, and amendments. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 36, p. 137-142, 1972.
- 108) REICOSKY, D. C. Soil management for efficient water use: Soil-profile modification effects on plant growth and yield in the southeastern United States. In: TAYLOR, H. M.; JORDAN, W. R.; SINCLAIR, T. R. Limitations to efficient water use in crop production. Madison: Am. Soc. Agron., Crop Sci. Am., Soil Sci. Soc. Am., 1977. p.471-477.

- 109) REICOSKY, D. C.; RITCHIE, J. T. Relative importance of soil resistance and plant resistance in root water absorption. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 40, p. 293-297, 1976.
- 110) RIDGE, I.; OSBORNE, D. J. Hydroxyproline and peroxidases in cell walls of Pisum sativum: regulation by ethylene. Journal of Experimental Botany, Oxford, v. 21, p. 843-856, 1970.
- 111) RIOS, M. A.; PEARSON, R. W. The effects of some chemical environmental factors on cotton root behavior. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 28, p. 232-235, 1964.
- 112) RITCHEY, K. D.; SILVA, J. E.; COSTA, R. F. Calcium deficiency in clayey B horizons of savana oxisols. Soil Science, Baltimore, v. 133, n. 6, p. 378-382, 1982.
- 113) ROBERTSON, W. K. et al.. Results from subsoiling and deep fertilization of corn for 2 years. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 21, p. 340-346, 1957.
- 114) ROBERTSON, W. K. et al.. Soil profile modification studies in Florida. Soil and Crop Sci. Soc. of Florida Prod., v. 35, p. 144-150, 1976.
- 115) RUSSEL, R. S. Plant root systems - their function and interaction with the soil. In: RUSSEL, R. S.; IGUE, K.; MEHTA, Y. R. The soil/root system in relation to brazilian agriculture. Londrina: Fundação Instituto Agronômico do Paraná, 1981. p. 3-19.
- 116) RUSSEL, R. S.; GOSS, M. J. Physical aspects of soil fertility the response of roots to mechanical impedance. Netherlands Journal Agricultural Science, Amsterdam, v. 22, p. 305-318, 1974.

- 117) SCHUURMANN, J. J. influence of soil density on root development and growth of oats. Plant and Soil, The Hague, v. 22, n. 3. p. 352-374, 1965.
- 118) SCHUURMANN, J. J.; GOEDEWAAGEM, M. A. J. Methods for the examination of root systems and roots. 2nd. ed. Wageningen: Pudoc, 1971. 86p.
- 119) SHENK, M. K.; BARBER, S. A. Root characteristics of corn genotypes as related to P uptake. Agronomy Journal, Madison, v. 71, p. 921-924, 1979.
- 120) SILVA, I. F. Efeitos de sistemas de manejo e tempo de cultivo sobre propriedades físicas de um Latossolo. Porto Alegre, 1980. 80f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- 121) SOILEAU, J. M.; ENGELSTAD, O. P.; MARTIN JR., J. B. Cotton growth in an acid fragipan sugsoil: II. Effects of soluble calcium, magnesium, and aluminum on roots and tops. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 33, p. 919-924, 1969.
- 122) SOUZA, D. M. G. de; RITCHEY, K. D. Correção de acidez sub-superficial: uso de gesso no solo de cerrado. In: SIMPÓSIO AVANÇADO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. Campinas: Fundação Cargill, 1986. p. 91-113.
- 123) STOLZY, L. H.; BARLEY, K. P. Mechanical resistance encountered by roots entering compact soils. Soil Science, Baltimore, v. 105, p. 297-301, 1968.
- 124) STOLZY, L. H.; FLUEHLER, H. Measurement and prediction of anaerobiosis in soils. In: NIELSEN, D. C.; MAC DONALD, J. G. Nitrogen in the environment. New York: Academic Press, 1978. v. 1, p. 363-426.

- 125) SUMNER, M. E.; BOSWELL, F. C. Alleviating nutrient stress. In: ARKIN, G. F.; TAYLOR, H. M. Modifying the root environment to reduce crop stress. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1981. p. 99-137.
- 126) TARDIEU, F. Root system responses to soil structural properties: micro-and macro-scale. In: LARSON, W. E. et al. Mechanics and related processes in structured agricultural soils. Dordrecht: Kluwer Academic, 1989. p. 153-171.
- 127) TARDIEU, F.; MANICHON, H. Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée, I. - Discussion des critères d'étude. Agronomie, Versailles, v. 6, n. 4, p. 345-354, 1986.
- 128) TARDIEU, F.; MANICHON, H. Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. II - Une méthode d'étude de la répartition verticale et horizontale des racines. Agronomie, Versailles, v. 6, n. 5, p. 415-425, 1986.
- 129) TARDIEU, F.; MANICHON, H. Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. I. - Modélisation d'états structuraux types de la couche labourée. Agronomie, Versailles, v. 7, n. 2, p. 123-131, 1987.
- 130) TARDIEU, F.; MANICHON, H. Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. II - Croissance et disposition spatiale du système racinaire. Agronomie, Versailles, v. 7, n. 3, p. 201-211, 1987.
- 131) TARDIEU, F.; MANICHON, H. Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. III - Disponibilité des réserves en eau de sol. Agronomie, Versailles, v. 7 n. 4, p. 279-288, 1987.

- 132) TAYLOR, G. M. Root behavior as affected by soil structure and strength. In: CARSON, E. W. The plant root and its environment. Charlottesville, University Press of Virginia, 1974. p. 272-291.
- 133) TAYLOR, H. M. Managing root systems to reduce plant water deficits. In: RUSSEL, R. S.; IGUE, K.; MEHTA, Y. R. The soil/root system in relation to brazilian agriculture. Londrina: Fundação Instituto Agrônômico do Paraná, 1981. p. 45-60.
- 134) TAYLOR, H. M.; ARKIN, G. F. Root zone modification: fundamentals and alternatives. In: ARKIN, G. F.; TAYLOR, H. M. Modifying the root environment to reduce crop stress. St. Joseph: America Society of Agricultural Engineers, 1981. p. 3-16.
- 135) TAYLOR, H. M.; BURNETT, E. Influence of soil strength on the root-growth habits of plants. Soil Science, Baltimore, v. 98, p. 174-180, 1964.
- 136) TAYLOR, H. M.; GARDNER, H. R. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of soil. Soil Science, Baltimore, v. 96, p. 153-156, 1963.
- 137) TAYLOR, H. M.; KLEPPER, B. Water uptake by cotton root system: an examination of assumption in the single root model. Soil Science, Baltimore, v. 120, p. 57-67, 1975.
- 138) TAYLOR, H. M.; MATHERS, A. C.; LOTSPEICH, F. B. Pans in southern Great Plains soils I. Why root-restricting pans occur. Agronomy Journal, Madison, v. 56, p. 328-322, 1964.

- 139) TAYLOR, H. M.; RATLIFF, L. F. Root growth pressures of cotton, peas, and peanuts. Agronomy Journal, Madison, v. 61, p. 398-402, 1969a.
- 140) TAYLOR, H. M.; RATLIFF, L. F. Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strenght and water content. Soil Science, Baltimore, v. 108, p. 113-119, 1969b.
- 141) TAYLOR, H. M.; ROBERTSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength-root penetration relations for medium-to coarse-textured soils materials. Soil Science, Baltimore, v. 102, p. 18-22, 1966.
- 142) TENNANT, D. A test of a modified line intersect method of estimating root length. The Journal of Ecology, Oxford, v. 63, p. 995-1001, 1975.
- 143) THOMPSON, P. J.; JANSEN, I. I.; HOOKS, L. L. Penetrometer and bulk density as parameter for predicting root systems performance in mine soils. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 51, p. 1288-1293, 1987.
- 144) THROCKMORTON, R. I. Tillge and planting equipment for reduced tillage. In: SPRAGUE, M. A.; TRIPLETT, G. B. No-tillage and surface-tillage agriculture. New York: J. Wiley, 1986. p. 59-91.
- 145) TORMENA, C. Resistência à penetração e porosidade em plantio direto influenciados por preparos pré-implantação, calagem e tráfego. Curitiba, 1991. 155f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Ciência do Solo) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- 146) TROUGHTON, A. Root mass and distribution. In: HODGSON, J. et al. Sward measurement handbook. Maidenhead: British Grassland Society, 1981. p. 159-177.

- 147) UNGER, P. W. Effects of deep tillage and profile modification on soil properties, root growth, and crop yields in the United States and Canada. Geoderma, Amsterdam, v. 22, p. 275-295, 1979.
- 148) UNGER, P. W. Water relations of a profile-modified slowly permeable soil. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 34, p. 492-495, 1970.
- 149) UNGER, P. W.; ECK, H. V.; MUSICK, J. T. Alleviating plant water stress. In: ARKIN, G. F.; TAYLOR, H. M. Modifying the root environment to reduce crop stress. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1981. p. 61-95.
- 150) VAADIA, Y.; ITAY, C. Inter-relationships of growth with reference to the distribution of growth substances. In: WHITTINGTON, W. J. Root growth. London: Butterworths, 1969, p. 65-77.
- 151) VEEN, B. W. The influence of mechanical impedance on the growth of maize roots. Plant and Soil, The Hague, v. 66, p. 101-109, 1982.
- 152) VEEN, B. W.; BOONE, F. R. The influence of mechanical resistance and soil water on the growth of seminal roots of maize. Soil & Tillage Research, Amsterdam, v. 16, p. 219-226, 1990.
- 153) VEIHKMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. Soil density and root penetration. Soil Science, Baltimore, v. 65, p. 487-495, 1948.
- 154) VEPRASKAS, M. J.; MINNER, G. S.; FEEDIN, G. F. Relationship of dense tillage pans, soil properties and subsoiling to tobacco root growth. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 50, p. 1541-1546, 1986.

- 155) VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effects of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. Transactions of ASAE, St. Joseph, v. 4, p. 242-246, 1961.
- 156) VOORHEES, W. B. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviation wheel induced soil compaction. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 42, p. 129-133, 1983.
- 157) VOORHEES, W. B.; Min AMENIYA, R. R.; ALLMARAS, R. R.; LARSON, W. E. Some effects of aggregate structure heterogeneity on root growth. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 35, p. 638-643, 1971.
- 158) WHITELEY, G. M.; UTOMO, W. H.; DEXTER, R. A Comparison of penetrometer pressures and the pressures exerted by roots. Plant and Soil, The Hague, v. 61, p. 351-364, 1981.
- 159) WIERSUM, L. K. The relationship of the size and structural rigidity of pores to their penetration by roots. Plant and Soil, The Hague, v. 9, p. 75-85, 1957.
- 160) WILLIGEN, P. de; NOORDWIJK, N. Van. Roots, plant production and use efficiency. Wageningen, 1987. 282f. Thesis (Doctor of Philosophy) - Agricultural University Wageningen.
- 161) ZIMMERMANN, R. P.; KARDOS, L.T. Effect of bulk density on root growth. Soil Science, Baltimore, v. 91, p. 280-288, 1961.