

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA RADICULAR DE AMARANTO
(*Amaranthus cruentus*, variedade BRS ALEGRIA), DE MILHETO
(*Pennisetum glaucum* (L.), variedade BN-2) E DE PÉ DE GALINHA
(*Eleusine coracana* L.) EM DUAS CLASSES DE SOLO E QUATRO
DENSIDADES**

CASSIO ROBERTO PIFFER

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP -
Câmpus de Botucatu, para obtenção do
título de Mestre em Agronomia - Energia
na Agricultura

BOTUCATU – SP
Agosto – 2004

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA RADICULAR DE AMARANTO
(*Amaranthus cruentus*, variedade BRS ALEGRIA), DE MILHETO
(*Pennisetum glaucum* (L.), variedade BN-2) E DE PÉ DE GALINHA
(*Eleusine coracana* L.) EM DUAS CLASSES DE SOLO E QUATRO
DENSIDADES**

CASSIO ROBERTO PIFFER

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Hugo Benez

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP -
Câmpus de Botucatu, para obtenção do
título de Mestre em Agronomia - Energia
na Agricultura

BOTUCATU – SP
Agosto – 2004

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Sérgio Hugo Benez, pela orientação, dedicação e valiosos ensinamentos;

Aos meus pais, esposa e filha pelo apoio, incentivo e contribuição nesta dissertação;

Ao Prof. Dr. Joaquim Odilon Pereira (UNIOESTE) e a Prof.^a Dr.^a Maria Helena Moraes (FCA/UNESP), constituintes da banca examinadora;

Ao Prof. Dr. Ângelo Catâneo, pela atenção e auxílio nas análises estatísticas;

Ao Prof. Dr. Roberto Lyra Villas Boas, pela ajuda nos cálculos de adubação;

Aos Professores Dr. Carlos Alexandre da Costa Crusciol e Dr. Ciro Antônio Rosolem e ao meu colega José Salvador Simoneti pela contribuição no estudo de raízes;

Ao meu amigo, Erick Vinícius Bertolini pela amizade, disposição e participação neste trabalho;

Aos colegas do curso de Pós-Graduação Antônio Renan Berchol da Silva, Charles Duruoha, Denise Mahl, Elcio Hiroyoshi Yano, Fábio Rensi Cominetti, Paulo Roberto Arbex Silva e Rogério Germino;

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Rural/FCA Mauri Torres da Silva e Gilberto Winckler e ao funcionário Pedro Alves pelo auxílio na realização deste projeto;

Aos funcionários da Biblioteca Prof. Paulo de Carvalho Mattos e da Seção de Pós-Graduação pela gentileza e disposição ao longo da realização deste trabalho;

A CAPES, pelo auxílio financeiro concedido;

A todos que de alguma maneira colaboraram para realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	8
1 RESUMO	1
2 SUMMARY	3
3 INTRODUÇÃO.....	5
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
4.1 Efeitos da compactação no comportamento dos nutrientes	7
4.2 Compactação por equipamentos de preparo do solo.....	9
4.3 Problemas provenientes da compactação do solo	13
4.4 Efeitos da compactação do solo no desenvolvimento do sistema radicular.....	15
4.5 Cobertura vegetal e a compactação do solo	20
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	23
5.1 Material	23
5.1.1 Localização da área experimental.....	23
5.1.2 Espécies utilizadas.....	23
5.1.3 Solos	26
5.1.4 Calagem e adubação	27
5.1.5 Tratos culturais	27
5.1.6 Aparelho de Proctor.....	28
5.1.7 Prensa hidráulica.....	30
5.1.8 Penetrômetro.....	30
5.1.9 Anéis de PVC	30
5.2 Métodos.....	31
5.2.1 Delineamento experimental.....	31
5.2.2 Correção do teor de água	31
5.2.3 Compactação dos solos.....	31
5.2.4 Montagem e remoção dos vasos	32
5.2.5 Avaliação da parte aérea.....	34
5.2.6 Avaliação do sistema radicular.....	34

5.2.7 Análise estatística	37
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
6.1 Morfologia radicular	38
6.1.1 Comprimento radicular	38
6.1.2 Diâmetro radicular	44
6.1.3 Volume radicular	48
6.1.4 Massa seca radicular	53
6.2 Morfologia da parte aérea	60
6.2.1 Altura e massa seca da parte aérea	60
7 CONCLUSÕES	66
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

ÍNDICE DE ÍNDICES

1	Resultados das análises químicas do Nitossolo Vermelho Distroférico (NVD) e do Latossolo Vermelho Distrófico (LVD).....	26
2	Resultados das análises granulométricas do Nitossolo Vermelho Distroférico (NVD) e do Latossolo Vermelho Distrófico (LVD).....	26
3	Resistência do solo à penetração	32
4	Médias com indicações das comparações efetuadas pelo teste de Tukey. Quadrados médios e indicações de significância estatística obtidos nas análises de variância do comprimento radicular (cm.cm^{-3}) em função das espécies, classes de solo e densidades nas quatro camadas dos vasos	39
5	Desdobramento da interação classes de solo versus espécies referente ao comprimento radicular (cm.cm^{-3}) nas quatro camadas dos vasos	41
6	Desdobramento da interação densidades versus espécies referente ao comprimento radicular (cm.cm^{-3}) nas quatro camadas dos vasos.....	43
7	Médias com indicações das comparações efetuadas pelo teste de Tukey. Quadrados médios e indicações de significância estatística obtidos nas análises de variância do diâmetro radicular (mm) em função das espécies, classes de solo e densidades nas quatro camadas dos vasos.....	45
8	Desdobramento da interação classes de solo versus espécies referente ao diâmetro radicular (mm) nas quatro camadas dos vasos	46
9	Desdobramento da interação densidades versus espécies referente ao diâmetro radicular (mm) nas quatro camadas dos vasos.....	47
10	Médias com indicações das comparações efetuadas pelo teste de Tukey. Quadrados médios e indicações de significância estatística obtidos nas análises de variância do volume radicular (cm^3) em função das espécies, classes de solo e densidades nas quatro camadas dos vasos	49
11	Desdobramento da interação classes de solo versus espécies referente ao volume radicular (cm^3) nas quatro camadas dos vasos.....	50

12 Desdobramento da interação densidades versus espécies referente ao volume radicular (cm^3) nas quatro camadas dos vasos.....	51
13 Médias com indicações das comparações efetuadas pelo teste de Tukey. Quadrados médios e indicações de significância estatística obtidos nas análises de variância da massa seca radicular (g) em função das espécies, classes de solo e densidades nas quatro camadas dos vasos	54
14 Desdobramento da interação classes de solo versus espécies referente a massa seca radicular (g) nas quatro camadas dos vasos.....	56
15 Porcentagem de massa seca radicular referente as classes de solo versus as espécies nas quatro camadas dos vasos	57
16 Desdobramento da interação densidades versus espécies referente a massa seca radicular (g) nas quatro camadas dos vasos.....	58
17 Porcentagem de massa seca radicular referente as densidades versus as espécies nas quatro camadas dos vasos.....	60
18 Médias com indicações das comparações efetuadas pelo teste de Tukey. Quadrados médios e indicações de significância estatística obtidos nas análises de variância da altura (m) e massa seca (g) da parte aérea em função das espécies, classes de solo e densidades.....	61
19 Desdobramento da interação classes de solo versus espécies referente a altura (m) e massa seca (g) da parte aérea das plantas	62
20 Desdobramento da interação densidades versus espécies referente a altura (m) e a massa seca (g) da parte aérea das plantas	64

ISTA DE IGRAS

F	P
1 Amaranto cultivado em quatro densidades.....	24
2 Milheto cultivado em quatro densidades	25
3 Pé de galinha cultivado em quatro densidades	25
4 Tela cercando e protegendo o experimento	28
5 Curva de compactação para o Nitossolo Vermelho Distroférrico.....	29
6 Curva de compactação para o Latossolo Vermelho Distrófico	29
7 Vaso montado com quatro anéis de PVC	33
8 Bordadura e sistema de irrigação para a cultura do pé de galinha	33
9 Remoção do vaso.....	35
10 Lavagem do sistema radicular sobre peneira.....	35
11 Sistema radicular lavado e dividido em quatro partes.....	36
12 Sistema radicular armazenado em recipiente plástico	36
13 Comprimento radicular (cm.cm^{-3}) das espécies em função das densidades do solo para as diversas camadas dos vasos.....	40
14 Comprimento radicular (cm.cm^{-3}) do pé de galinha em função das camadas dos vasos (CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B – camadas inferiores) para diversas densidades	42
15 Comprimento radicular (cm.cm^{-3}) do milheto em função das camadas dos vasos (CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B – camadas inferiores) para diversas densidades	43
16 Comprimento radicular (cm.cm^{-3}) do amaranto em função das camadas dos vasos (CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B – camadas inferiores) para diversas densidades	44
17 Volume radicular (cm^3) das espécies em função das densidades do solo para as diversas camadas dos vasos.....	48

18	Volume radicular (cm ³) do pé de galinha em função das camadas dos vasos (CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B – camadas inferiores) para diversas densidades.....	52
19	Volume radicular (cm ³) do milho em função das camadas dos vasos (CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B – camadas inferiores) para diversas densidades.....	52
20	Volume radicular (cm ³) do amaranto em função das camadas dos vasos (CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B – camadas inferiores) para diversas densidades.....	53
21	Massa seca radicular (g) das espécies em função das densidades do solo para as diversas camadas dos vasos.....	55
22	Massa seca radicular (g) do pé de galinha em função das camadas dos vasos (CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B – camadas inferiores) para diversas densidades.....	56
23	Massa seca radicular (g) do milho em função das camadas dos vasos (CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B – camadas inferiores) para diversas densidades.....	59
24	Massa seca radicular (g) do amaranto em função das camadas dos vasos (CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B – camadas inferiores) para diversas densidades.....	59
25	Altura da parte aérea (m) das três espécies versus as classes de solo (LVD – latossolo vermelho distrófico; NVD – nitossolo vermelho distroférrico)	63
26	Massa seca da parte aérea (g) das três espécies versus as classes de solo (LVD – latossolo vermelho distrófico; NVD – nitossolo vermelho distroférrico)	63
27	Altura da parte aérea (m) das espécies em função das densidades do solo	65
28	Massa seca da parte aérea (g) das espécies em função das densidades do solo	65

1 RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo estudar o desenvolvimento do sistema radicular de amaranto (*Amaranthus cruentus*, variedade BRS Alegria), de milho (*Pennisetum glaucum* (L.), variedade BN-2) e de pé de galinha (*Eleusine coracana* L.) em função de quatro níveis de compactação, caracterizados pelas densidades de 1,21; 1,31; 1,41 e 1,51 Mg.m⁻³ em duas classes de solo, classificados como Latossolo Vermelho Distrófico e Nitossolo Vermelho Distroférrico. O experimento foi conduzido no campo da Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP, Campus de Botucatu/SP, durante os meses de Novembro de 2002 à Fevereiro de 2003, em um delineamento experimental de blocos ao acaso com quatro repetições em arranjo fatorial de 2 x 3 x 4. Os vasos foram montados com quatro anéis de PVC sobrepostos, com diâmetro interno de 19,5 cm, totalizando 40 cm de altura. Estes comportaram um volume de 12,56 litros de solo, sendo que somente um anel foi compactado, correspondendo à profundidade de 10 a 20 cm. Os vasos, assim montados, foram enterrados a 40 cm de profundidade, encerrando-se o experimento na fase da inflorescência de cada cultura. A seguir, determinou-se o comprimento radicular, volume radicular, diâmetro radicular, massa seca radicular, bem como a massa seca e altura das partes aéreas das plantas. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância com teste de Tukey a 5 % de probabilidade para comparar as médias. Os resultados mostraram que o pé de galinha apresentou, em relação ao amaranto e ao milho, o sistema radicular com maior comprimento,

volume e massa seca, penetrando nas camadas compactadas dos solos até a densidade $1,41 \text{ Mg.m}^{-3}$, aumentando, desta forma, a aeração dos solos e incorporando a matéria orgânica em profundidade; o milho proporcionou maior quantidade de massa seca na parte aérea em ambos os solos, mostrando ter melhor característica para cobertura do solo, quando comparado ao amaranho e ao pé de galinha; o amaranho foi mais sensível à compactação dos solos em todas as densidades e variáveis estudadas quando comparado ao milho e ao pé de galinha; o Latossolo Vermelho Distrófico propiciou melhor condição de desenvolvimento das plantas em estudo, por apresentar menor resistência à penetração das raízes quando comparado ao Nitossolo Vermelho Distroférico.

PALAVRAS-CHAVE: compactação do solo, sistema radicular, cobertura vegetal.

DEVELOPMENT OF ROOT SYSTEM OF AMARANTH (*Amaranthus cruentus*, BRS ALEGRIA variety), MILHET (*Pennisetum glaucum* (L.), BN-2 variety) AND “PÉ DE GALINHA” (*Eleusine coracana* L.) IN TWO SOIL TYPES IN FOUR DENSITIES. Botucatu, 2004. 79p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: CÁSSIO ROBERTO PIFFER

Adviser: SÉRGIO HUGO BENEZ

2 SUMMARY

This paper aimed to study the development of root system of amaranth (*Amaranthus cruentus*, BRS Alegria variety), milhet (*Pennisetum glaucum* (L.) BN-2 variety) and “pé de galinha” (*Eleusine coracana* L.) according to four density levels of soil compaction, characterized by 1,21; 1,31; 1,41 and 1,51 Mg.m⁻³ densities within two soil types, classified as Distrofic Red Latosol and Distroferic Red Nitosoil. The experiment was carried out at Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP – Botucatu/SP, from November 2002 to February 2003, in a randomized block experimental design with four repetitions and 2 x 3 x 4 factorial desing. The pots were assembled with four rings of overlaid PVC tubes, 19,5 cm of inner diameter, summing up 40 cm high, containing 12,56 liters of soil, with only ring compacted at 10 to 20 cm depth. Tubes were assembled and buried at 40 cm depth. The experiment was finished at inflorescence phase of each culture. Measurement of root length, root volume, root diameter, root dry matter were measured as well as dry matter and lenght of aerial part of plants. Obtained data were submitted to variance analysis under Tukey’s test with 5 % of probability for mean comparison. Results showed that the “pé de galinha” showed, regarding to amaranth and milhet, root system with longer length, volume and dry matter working in compacted soil layer up to 1,41 Mg.m⁻³ density increasing soil aeration and incorporating organic matter; milhet showed the highest aumont of dry matter at aerial part in both soils showing to have good characteristic for soil covering, compared to amaranth and

“pé de galinha”; amaranth was sensitive to soil compaction in all the studied densities and variables compared to milhet and “pé de galinha”; and the Distrophic Red Latosol showed best easy terms to plants development, to present a lower resistance to root penetration compared to Distrophic Red Nitosol.

KEYWORDS: soil compaction, root system, vegetal covering.

3 INTRODUÇÃO

A compactação do solo é causada pela movimentação de máquinas, tratores e implementos agrícolas durante o preparo do solo, semeadura, tratos culturais, colheita e transporte, podendo ocasionar demora na emergência das plantas, plantas mais baixas que o normal, folhas com coloração não característica, sistema radicular superficial, raízes malformadas, aumento da resistência mecânica ao crescimento radicular, bem como redução na taxa de infiltração da água no solo, na macroporosidade, na aeração, na disponibilidade de água e nutrientes e conseqüentemente decréscimo na produtividade agrícola.

As plantas desenvolvem-se melhor em solos que não apresentam limitações ao crescimento radicular, portanto com baixa densidade, porém alta o suficiente para oferecer bom contato raízes-partículas de solo (AVIDSSON; HAKANSSON, 1991).

As raízes são imprescindíveis ao processo de absorção de água e nutrientes; os estudos sobre seu crescimento, concentração, distribuição e atividade (taxa de crescimento e longevidade) no perfil do solo são fundamentais para o entendimento dos sistemas de produção das culturas (TAYLOR; ARKIN, 1981).

A capacidade das raízes de penetrarem nas camadas compactadas varia de um solo para outro, e mesmo, de uma planta para outra. O tipo de raiz da espécie vegetal também deve ser levado em consideração no processo de penetração em solos compactados.

Raízes pivotantes de grande diâmetro são menos eficientes na penetração de solos com alta densidade (BORGES et al., 1988).

O cultivo de espécies vegetais de cobertura além de proteger o solo da insolação direta reduzindo sua temperatura, diminui também a incidência de plantas daninhas pelo efeito alelopático (substâncias que inibem a germinação e/ou desenvolvimento) ou pelo potencial supressor, impede o impacto direto das gotas de chuva sobre o solo aumentando a infiltração de água, bem como evita o selamento superficial, reduzindo assim as perdas de água e solo pelo processo erosivo (DERPSCH et al., 1991). Muitas vezes, não se dá importância a outras qualidades dessas espécies, como por exemplo, a melhoria das características físicas do solo. Certas plantas de cobertura têm enraizamento amplo e profundo no solo bem maior do que aquele alcançado por culturas agrícolas; as mesmas conseguem romper camadas compactadas, promovendo maior fluxo vertical de matéria orgânica e aumentando, desta forma, sua estruturação, tornando o solo poroso (OSTERROHT, 2002).

Na literatura consultada foi verificado que são poucos os estudos relacionados às plantas de cobertura com sistema radicular agressivo e profundo que penetrem nas camadas compactadas do solo, deixando canais que favoreçam condições ao desenvolvimento de raízes da cultura posterior.

Assim, os objetivos deste trabalho consistem na identificação, quantificação e comparação do desenvolvimento do sistema radicular de amaranto (*Amaranthus cruentus*, variedade BRS Alegria), de milheto (*Pennisetum glaucum* (L.), variedade BN-2), e de pé de galinha (*Eleusine coracana* L.) em duas classes de solo e quatro densidades.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Efeitos da compactação no comportamento dos nutrientes

Hallmark e Barber (1981), submeteram plantas de soja a diferentes densidades do solo tanto na ausência como na presença de potássio, verificando que na menor densidade ($1,25 \text{ Mg.m}^{-3}$) a adubação potássica aumentou significativamente a absorção de cálcio e inalterou a absorção de magnésio; na maior densidade ($1,45 \text{ Mg.m}^{-3}$) a adubação potássica inibiu significativamente a absorção de cálcio e magnésio.

Silberbush et al. (1983), estudaram o efeito da compactação do solo na absorção de potássio pela soja na ausência e presença de fósforo, detectando-se redução no teor de potássio devido ao aumento da densidade do solo, independentemente da presença de fósforo. Segundo os autores a redução no teor de potássio deve-se ao menor crescimento radicular ou a diminuição do movimento do íon potássio no solo.

Shierlaw e Alston (1984), submeteram plantas de milho e centeio nas densidades do solo de $1,20$ a $1,75 \text{ Mg.m}^{-3}$, analisando a influência da compactação do solo na absorção de fósforo; observaram que houve um aumento na absorção de fósforo em função do aumento da compactação do solo, sendo mais significativo para o centeio; contudo este fato não correspondeu em um maior desenvolvimento vegetal.

As concentrações de fósforo, potássio e magnésio na parte aérea das plantas de soja aumentam com a compactação até a densidade de $1,0 \text{ Mg.m}^{-3}$, diminuindo daí

por diante até a densidade estudada de $1,35 \text{ Mg.m}^{-3}$. A concentração de cálcio reduziu linearmente com o aumento da densidade do solo (BORGES et al., 1988).

Rosolem et al. (1994b), observaram que a calagem tem efeito positivo no crescimento radicular, na produção de matéria seca e na absorção de nutrientes pelo milho, independentemente da compactação do solo.

A soja responde ao fósforo em termos de crescimento e aumento de absorção de nutrientes apenas quando o solo não está compactado. As respostas ao fósforo diminuem à medida que aumenta a densidade do solo. A partir da densidade de $1,52 \text{ Mg.m}^{-3}$, o crescimento radicular fica completamente inibido (FERNANDES et al., 1995).

Hoffman e Jungk (1995), verificaram que o aumento da densidade do solo causa diminuição da difusibilidade do fósforo; esse acontecimento está relacionado tanto com a redução do teor de água no solo, como com o aumento do fator impedância (índice relacionado com a tortuosidade dos capilares do solo).

Borges et al. (1997), utilizando colunas formadas pela sobreposição de três anéis de PVC, estudaram três doses de calcário (0,0; 2,031 e $4,062 \text{ t há}^{-1}$), cinco doses de gesso (0,0; 0,508; 1,016; 1,524 e $2,032 \text{ t há}^{-1}$) aplicadas no anel superior da coluna e cinco densidades do solo aplicadas no anel central (1,10; 1,25; 1,40; 1,55 e $1,70 \text{ Mg.m}^{-3}$) em Latossolo Vermelho-Escuro, observaram que tanto a densidade como as doses de gesso promoveram aumento nos teores de cálcio e redução do Al^{+3} na camada compactada; contudo, esses efeitos foram dependentes das doses de calcário utilizadas em mistura com o gesso.

Santos (2001), estudando graus de compactação do solo e adubação fosfatada no crescimento do milho, verificou que quanto maior o grau de compactação, maior terá que ser as doses aplicadas de fósforo. Segundo o autor, o fósforo funciona como um fator de diminuição da compactação do solo.

De acordo com Silva e Rosolem (2001), a compactação em subsuperfície diminui a nutrição da soja, sendo esta beneficiada quando cultivada em sucessão com as plantas de cobertura de solo como: aveia-preta, guandu, milheto, mucuna-preta, sorgo granífero e tremoço azul.

4.2 Compactação por equipamentos de preparo do solo

Fernandes et al. (1983), observando o efeito de três sistemas de preparo: convencional (uma aração com arado de aiveca e duas gradagens), escarificação e plantio direto, duas classes de solo (Typic Argioqual e Typic Hapludalf) em três profundidades (0-10, 10-20 e 20-30 cm), verificaram que nas duas primeiras profundidades, a escarificação apresentou menores valores de densidade do solo e maiores de porosidade total.

De acordo com Sidiras et al. (1984), a densidade do solo é maior no preparo convencional (uma aração e duas gradagens) do que no plantio direto em um solo classificado como Latossolo Roxo Distrófico.

Vieira e Muzilli (1984), comparando o sistema de plantio direto e preparo convencional (uma aração com arado de disco e duas gradagens niveladoras) sob três rotações de cultura (soja, milho e trigo), observaram que a 10 cm de profundidade o plantio direto aumentou significativamente a densidade do solo e a microporosidade, com conseqüente redução da porosidade total e macroporosidade; os autores, também não encontraram diferença a 30 cm em um solo classificado como Latossolo Vermelho-Escuro. As rotações de cultura não interferiram significativamente nas condições físicas do solo.

Centurion e Demattê (1985), estudando os efeitos dos sistemas de preparo do solo: convencional (aração e gradagens pesada e niveladora), reduzido (gradagens pesada e niveladora), semeadura direta (roçada e aplicação de herbicida), superpreparo (duas arações e gradagens pesada e niveladora) em Latossolo Vermelho-Escuro na cultura da soja, verificaram que, com exceção da semeadura direta, os demais sistemas de preparo induziram a formação de camadas compactadas.

A semeadura direta e a grade pesada levam a maior concentração de raízes do trigo na camada superficial, sendo que a aração e a escarificação proporcionam melhor distribuição do sistema radicular (ROSOLEM et al., 1992).

Anjos et al. (1994), estudando quatro classes de solo (Latossolo Vermelho-Amarelo Húmico Álico, Cambissolo Húmico Álico, Cambissolo Bruno Húmico Álico e Podzólico Vermelho-Escuro Distrófico) do Estado de Santa Catarina, sob mata nativa, cultivo convencional, plantio direto, cultivo convencional com subsolagem e pastagem nativa, notaram aumento na densidade do solo nos sistemas de manejo em relação à mata nativa, com

exceção do Podzólico Vermelho-Escuro Distrófico; os autores não verificaram diferença significativa entre as profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm; o aumento da densidade do solo provocado pelos sistemas de manejo, em geral, não alcançou níveis considerados críticos ao desenvolvimento das raízes.

Segundo Albuquerque et al. (1995), os sistemas de manejo do solo: plantio direto e convencional (uma escarificação e uma gradagem antes das culturas de inverno e uma aração e duas gradagens antes das culturas de verão) não mostraram diferenças de densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade. A sucessão trigo/soja apresentou maior densidade do solo e menor porosidade total que os esquemas de rotação de culturas (aveia + ervilhaca/milho, aveia/soja).

De acordo com Klepker e Anghinoni (1995), a densidade do solo, macro e microporosidade total e a resistência mecânica do solo à penetração, avaliadas no espigamento do milho apresentaram valores semelhantes nos três sistemas de preparo: convencional (uma aração e uma gradagem), em faixas e sem preparo.

Nos sistemas de preparo: subsolagem e enxada rotativa, enxada rotativa, aração e gradagem, aração e semeadura e plantio direto não foram evidenciadas diferenças significativas para densidade do solo na cultura do milho em Terra Roxa Estruturada (MORAES; BENEZ, 1996).

Segundo Pizaia (1996), a compactação reduz mais acentuadamente o crescimento da parte aérea das plantas que o crescimento radicular de milho submetido aos solos arado e sem preparo com camada compactada.

Tormena e Roloff (1996), comparando os sistemas de preparo com arado de disco, arado de aiveca e arado rotativo nas profundidades de 20, 35 e 60 cm respectivamente, dois níveis de calagem (dose de calcário para 70% de saturação do complexo de troca e sem calcário adicional), faixas com e sem tráfego acumulativo de trator e colhedora na implantação do plantio direto, deduziram que os preparos com arado de disco e arado de aiveca mostraram-se mais susceptíveis à compactação do solo pelo tráfego, em face do efeito causado por camadas compactadas em subsuperfície.

Figueiredo (1998), analisando um solo classificado como Latossolo Roxo, relatou que não houve diferença estatística entre os manejos de solo quando utilizou

preparo com arado de disco, arado de aiveca, grade, escarificador e plantio direto em relação à densidade do solo, densidade das partículas e teor de água crítica de compactação.

Klein (1999), comparando os manejos plantio direto não irrigado e plantio direto irrigado no Latossolo Roxo Ácrico (Typic Acrorthox), relatou que a estrutura do solo foi afetada pelos manejos até a profundidade de 40 cm com maior intensidade no solo sob plantio direto irrigado, ocasionando aumento significativo na densidade do solo com conseqüente redução na porosidade, alteração na distribuição do diâmetro dos poros, aumento da resistência à penetração; ainda verificou, redução da aeração do solo, diminuição de água do solo saturado, redução na taxa de infiltração da água no solo e alteração nos limites de plasticidade.

As operações de preparo do solo são realizadas para criar condições favoráveis à germinação e ao crescimento radicular das culturas. Entretanto, as condições do teor de água durante o preparo, o teor de argila e de matéria orgânica do solo, a profundidade de mobilização e o tipo de implemento utilizado, podem levar a modificações da estrutura do solo, acarretando restrições ao crescimento das raízes (MARIA et al., 1999).

Nos sistemas de preparo do solo com grade pesada e semeadura direta em Latossolo Roxo, ocorreram compactações do solo entre 10 a 30 cm e 10 a 20 cm, respectivamente, avaliadas por meio da resistência do solo com penetrômetro de impacto (MARIA et al., 1999).

Siqueira (1999), verificou os efeitos do sistema de cultivo em diferentes teores de água (33, 37 e 39%) sobre a compactação do solo em Latossolo Roxo Distrófico, concluindo que nos teores de água 33 e 39% a densidade do solo é mais elevada no cultivo mínimo (escarificador e semeadura) do que na semeadura direta. No teor de 33%, o sistema de cultivo mínimo propiciou maior redução na resistência à penetração do que no sistema de semeadura direta; nos teores de 37 e 39% houve acréscimo da resistência à penetração em ambos os sistemas.

Stone e Silveira (1999), analisando os efeitos dos sistemas de preparo com arado de aiveca, grade aradora e plantio direto na cultura do feijão sob irrigação em Latossolo Vermelho-Escuro, evidenciaram que o preparo com arado propiciou menores valores de resistência à penetração, ao longo do perfil do solo. O preparo com grade

condicionou uma camada mais densa entre 10-24 cm de profundidade e em plantio direto houve maior compactação de 15-22 cm.

Figueiredo et al. (2000), estudando os seguintes sistemas de manejo de preparo com arado de disco, escarificador, semeadura direta, arado de aiveca e grade em Latossolo Roxo, verificaram que os valores de densidade máxima e teor de água crítica para os diferentes sistemas de manejo não foram estatisticamente diferentes.

Costa (2001), após 20 anos de investigação, observou que o sistema plantio direto reduz tanto a densidade do solo em subsuperfície como a temperatura superficial, aumentando a estabilidade de agregados, os teores de carbono orgânico e de cátions trocáveis principalmente na camada superficial (0-10 cm) do solo, em comparação ao sistema de preparo convencional, no solo classificado como Latossolo Bruno.

Faria (2001), comparando sistemas de plantio direto e plantio convencional em Latossolo Vermelho-Escuro, na cultura do arroz em monocultivo ou em rotação anual, bienal com milho ou soja e sequência de milheto/arroz, crotalária/arroz e milho/arroz ou em rotação bienal, trienal ou quadrienal, verificou que os valores de densidade do solo foram elevados no sistema plantio direto; os sistemas agrícolas (arroz em sucessão e crotalária/arroz em sucessão) foram os que contribuíram para maior redução da densidade do solo.

Pedrotti et al. (2001), observando o cultivo de arroz irrigado e a compactação de um Planossolo, concluíram que os sistemas de preparo convencional de solo contribuem para a degradação física do mesmo, propiciando o surgimento de camadas compactadas.

Na cultura do milho, Seixas (2001), notou em Latossolo Vermelho Típico Distroférico que o tráfego adicional de colhedora e de trator apresentou uma prejudicial compactação do solo, demonstrada pela menor produtividade obtida; nos casos do subsolador e da testemunha apresentaram as maiores produtividades, maior altura das plantas, maior densidade das raízes e maior proporção espiga/planta.

De acordo com Watanabe (2001), os sistemas de preparo mínimo (escarificador e destorroador) e sem revolvimento do solo, proporcionam maiores valores de densidade e resistência à penetração e menores valores de macroporosidade quando

comparados com o preparo convencional de solo (arado de aiveca e grade niveladora) em um solo classificado como Latossolo Vermelho Distrófico.

Em solo classificado como Latossolo Vermelho Eutrófico, submetido a cinco anos de pousio, a resistência à penetração apresentou aumento significativo comparado ao solo sob cultivo intenso, independentemente do sistema de preparo do solo anteriormente utilizado (grade aradora ou enxada rotativa). Após cinco anos em pousio, a densidade do solo foi maior no sistema de preparo com grade aradora do que no sistema de preparo com enxada rotativa (PRADO et al., 2002).

De acordo com Silva et al. (2002b), uma camada de impedimento foi encontrada nas profundidades de 25 a 35 cm e 15 a 20 cm para o tratamento com arado de aiveca e enxada rotativa, respectivamente, em um solo classificado como Latossolo Vermelho Eutroférico.

Tormena et al. (2002), comparando os sistemas de preparo: plantio direto, preparo mínimo (escarificação e gradagem niveladora) e preparo convencional (aração com arado de aiveca e grade niveladora) na cultura da mandioca em Latossolo Vermelho Distrófico, constataram maiores valores de densidade do solo e menores valores de macroporosidade na camada de 0-10 cm no plantio direto e no preparo mínimo do solo. Resultados similares foram obtidos na avaliação da resistência do solo à penetração.

4.3 Problemas provenientes da compactação do solo

As amplitudes de variação das densidades dos solos situam-se dentro dos seguintes limites médios: solos argilosos de 1,00 à 1,25 Mg.m^{-3} ; solos arenosos de 1,25 à 1,40 Mg.m^{-3} ; solos húmíferos de 0,75 à 1,00 Mg.m^{-3} e solos turfosos de 0,20 à 0,40 Mg.m^{-3} (KIEHL, 1979). Já Brady, (1983) relatou que o teor reduzido de matéria orgânica dos solos arenosos contribui para aumentar a densidade desses solos. A densidade de solos argilosos, de barro argiloso e de barro siltico de superfície podem variar de 1,00 a 1,60 Mg.m^{-3} e para barros arenosos e areias variam de 1,20 a 1,80 Mg.m^{-3} . Subsolos muito compactos, independentemente da textura, podem atingir densidades tão elevadas como 2,0 Mg.m^{-3} ou superiores.

Ortolani et al. (1982), analisando dez compactações crescentes do solo na soja em Latossolo Vermelho-Escuro com resistência à penetração variando de 3,7 a 40,6 Mg.m^{-3} observaram que, conforme esta aumentou de 4,5 para 14,9 Mg.m^{-3} , a produção de grãos diminuiu de 10,2 para 5,2 g/planta. O tratamento que apresentou menor produção foi aquele que sofreu maior compactação (40,6 Mg.m^{-3} com 5,1 g/planta); notaram também que o aumento da compactação diminuiu a altura média das plantas.

O teor de matéria orgânica e o conteúdo de argila são fatores que influenciam os níveis de compactação do solo, sendo que teores elevados de argila e reduzidos de matéria orgânica resultam em níveis elevados de compactação do solo (SAINI; CHOW, 1984).

O termo compactação refere-se à compressão do solo não saturado durante a qual ocorre aumento de sua densidade em consequência da redução do volume, através da expulsão do ar (GUPTA; ALLMARAS, 1987 e FIGUEIREDO et al., 2000).

Com o aumento da densidade, o solo aumenta a sua resistência à penetração, ocasionando um sistema radicular superficial (MANTOVANI, 1987).

A compactação excessiva pode limitar a adsorção e/ou absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e desenvolvimento do sistema radicular, resultando em decréscimo da produção, aumento da erosão e da potência necessária para o preparo do solo (SOANE, 1990; DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996).

Na camada compactada, há uma modificação profunda nas características químicas e, principalmente nas características físicas do solo, de tal modo que o crescimento das raízes pode ser prejudicado, havendo, por conseguinte, menor crescimento das plantas (VESPRASKAS; WAGGER, 1990).

Novak et al. (1992), compararam a compactação obtida no campo com a determinada em laboratório através do Ensaio Normal de Proctor; os resultados obtidos pelos autores indicaram a possibilidade do Ensaio Normal de Proctor para predição de compactação em campo.

Entre as consequências diretas da compactação do solo estão as reduções da porosidade, da infiltração de água e aumento da resistência à penetração de raízes (KIRKEGAARD et al., 1993).

Horton et al. (1994), afirmou que o processo de compactação do solo afeta as propriedades hídricas do solo, assim como o fluxo de água (maior ou menor capilaridade) e que a retenção e o movimento de água são alterados em resposta às mudanças nas dimensões geométricas dos poros do solo.

Ferreira (1997), notou que a liberação do gás carbônico da respiração do solo é diminuída não somente pelo aumento da densidade, como também, pelo aumento no teor de água, evidenciando redução na aeração do solo com o aumento do grau de saturação.

De acordo com Klein et al. (2000), o aumento na densidade do Latossolo Roxo até $1,11 \text{ Mg.m}^{-3}$ proporciona elevação na armazenagem de água no solo, bem como a sua disponibilidade às plantas; já, para os valores superiores de densidade diminuem a disponibilidade de água.

Silva et al. (2000), estudando a suscetibilidade à compactação de Latossolo Vermelho-Escuro, concluíram que para níveis de densidade inicial do solo maior que $1,45 \text{ Mg.m}^{-3}$, a maior suscetibilidade à compactação ocorreu em grau de saturação próximo a 70%; já, para solos de menor compactação (densidade do solo inicial menor que $1,30 \text{ Mg.m}^{-3}$) a maior suscetibilidade verificou-se sob menores saturações, próximas a 50%.

Goedert et al. (2002), analisando o estado de compactação do solo em áreas cultivadas com plantio direto, observaram ausência de compactação, devido as boas características físicas originais do solo e ao adequado manejo das lavouras.

4.4 Efeitos da compactação do solo no desenvolvimento do sistema radicular

Grohnann e Queiroz Neto (1966), concluíram que houve um impedimento físico ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas de arroz quando a densidade do solo atingiu valores superiores a $1,42 \text{ Mg.m}^{-3}$ no Latossolo Roxo e $1,38 \text{ Mg.m}^{-3}$ no Podzólico Vermelho-Orto.

Em solos onde as raízes finas podem explorar canais radiculares e fissuras existentes, as culturas com raízes pivotantes são mais afetadas pela compactação que aquelas com raízes fasciculadas mais finas (WHITELEY; DEXTER, 1982).

A compactação do solo reduz o crescimento radicular da soja, podendo afetar tanto o desenvolvimento quanto a produtividade; o aumento da densidade do solo diminui o acúmulo de matéria seca radicular, principalmente, na camada compactada, este resultado foi conferido com experimentos em vasos (BENEZ et al., 1986 e MORAES et al., 1991). Resultados semelhantes foram observados por Nogueira e Manfredini (1983), que estudando a cultura da soja (Variedade Santa Rosa) em três densidades do solo (1,22; 1,44 e 1,75 Mg.m⁻³), verificaram que a densidade de 1,75 Mg.m⁻³ impediu totalmente a penetração de raízes e que o aumento da densidade do solo induziu em maior desenvolvimento de raízes na camada superior.

Borges et al. (1988), analisando variedades de soja (Bossier, Cristalina, Doko, IAC-b e Tropical) verificaram que na densidade de 1,25 Mg.m⁻³ houve ainda crescimento de raízes, o que não aconteceu na maior densidade de 1,35 Mg.m⁻³ para todas as variedades. Entre as modificações morfológicas nas raízes provocadas pela restrição ao crescimento estão o aumento do diâmetro e a diminuição do comprimento, tornando-as tortuosas.

Hatano et al. (1988), estudaram a relação entre a distribuição dos macroporos no solo e o alongamento radicular, observando uma dependência entre o tamanho dos poros e o crescimento das raízes. A maior proporção de raízes que cresceu dentro dos poros, foi encontrada no solo que apresentou maior quantidade de macroporos.

Khalilian et al. (1991), observaram que conforme aumentou a resistência do solo, houve uma diminuição no comprimento radicular, passando de 0,2 cm.cm⁻³ quando a resistência era 0,6 MPa e para 0,04 cm.cm⁻³ quando a resistência foi de 2,1 MPa.

Merten e Mielniczuk (1991), verificaram que mais de 70% das raízes de aveia-preta, trigo, soja e milho encontram-se na profundidade de 0-10 cm, tanto no sistema de semeadura direta como no sistema convencional.

A presença de uma camada compactada que impeça o desenvolvimento radicular da soja ao longo do perfil do solo, ainda pode levar a uma produtividade razoável, desde que não haja limitações de água e de nutrientes na zona de distribuição das raízes (TORRES et al., 1993).

Na cultura da soja, Rosolem et al. (1994a) estudando o sistema radicular em função da compactação do solo, concluíram que quando a camada compactada apresenta resistência a penetração de 0,69 MPa haverá uma redução de 50% no crescimento radicular.

A compactação em subsuperfície causa aumento da concentração de raízes do milho na camada superficial e drástica diminuição do crescimento radicular na camada mais profunda (ROSOLEM et al., 1994b).

O desenvolvimento das raízes das plantas de soja fica impedido quando a densidade do solo atinge valores de 1,30 e 1,23 Mg.m⁻³, respectivamente para a Terra Roxa estruturada e Latossolo Roxo (MORAES et al., 1995).

Raízes de plantas podem em determinadas condições penetrar nas camadas de solo com alta resistência mecânica à penetração, provocando desarranjos e formando canais que podem servir de passagem para exploração do solo por raízes de plantas futuras (BENNIE, 1996).

Tormena e Roloff (1996), considerando o índice de cone de 2,0 MPa como impeditivo ao crescimento de raízes no solo, verificaram que com massa de água de 0,34 Kg/ Kg de solo, não ocorreu condições impeditivas ao crescimento de raízes de ervilhaca, milho, aveia-preta e soja, na implantação do plantio direto.

Quando as raízes das plantas descompactadoras são decompostas, formam-se os chamados bioporos que exercem papel importante na movimentação de água e difusão de gases (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Klein et al. (1998), comparando plantio direto não irrigado e plantio direto irrigado, com o objetivo de estudar a influência da água e da densidade do solo sobre a resistência à penetração, adotou-se o valor de 2000 KPa como resistência crítica ao crescimento e funcionamento do sistema radicular, notaram que este valor ocorreu no sistema de plantio direto irrigado na tensão de 50 KPa, enquanto que no plantio direto de sequeiro a resistência foi limitante na tensão de 300 KPa.

Silva (1998), estudando o crescimento da soja em função da cultura anterior com: aveia preta, guandu, milheto, mucuna preta, sorgo e tremoço azul e da compactação em Latossolo Vermelho-Escuro, concluiu que a densidade do solo até 1,60

Mg.m⁻³ não impede o crescimento radicular das espécies; entretanto, a soja cultivada em seguida não apresenta crescimento radicular nesta densidade.

Fante Júnior et al. (1999), analisando a distribuição do sistema radicular de aveia forrageira, verificaram que suas raízes concentraram-se nas camadas iniciais do solo, cerca de 90% entre 0-20 cm.

No tratamento com grade pesada cerca de 50 % do sistema radicular da soja foi observado na camada superficial do Latossolo Roxo; já, 40 % no tratamento com semeadura direta e 30 % com escarificador (MARIA et al., 1999).

Plantas de milho submetidas à semeadura direta quando comparadas às do preparo convencional (aração e gradagem) tiveram o crescimento inicial das raízes diferidas do padrão diagonal normal e, ao final do ciclo, as raízes apresentaram maior raio médio nas profundidades de 10-15 cm e 25-35 cm, mostrando densidade de comprimento (cm.cm⁻³) maior na camada de 0-5 cm e menor na camada de 10-15 cm (MELLO IVO; MIELNICZUK, 1999).

Segundo Merotto Júnior e Mundstock (1999), as raízes de trigo podem crescer através dos poros e pontos de menor resistência, mas são incapazes de reduzir seu diâmetro para penetrar em poros menores.

O aumento da resistência do solo à penetração das raízes causa diminuição no comprimento e número de raízes seminais adventícias, bem como a raiz seminal primária mostra menor capacidade de penetração do que as raízes seminais adventícias. Resistência do solo à penetração da ordem de 1,3 MPa reduz à metade o crescimento das raízes seminais adventícias em plântulas de milho acondicionadas em tubos de PVC, cultivadas por quarenta e oito horas nas densidades do solo de 1,07; 1,18; 1,36 e 1,53 Mg.m⁻³ (ROSOLEM et al., 1999).

A compactação do solo tem como consequência a redução da porosidade e o aumento da resistência do solo à penetração, prejudicando sensivelmente o desenvolvimento radicular e a parte aérea da planta (SIQUEIRA, 1999).

Stone e Silveira (1999), verificando os efeitos dos sistemas de preparo com arado de aiveca, grade aradora e plantio direto na cultura do feijão sob irrigação em Latossolo Vermelho-Escuro, observaram que a distribuição do sistema radicular em profundidade foi mais uniforme no preparo com arado de aiveca. No preparo com grade

aradora houve concentração das raízes na camada de 0-10 cm de profundidade e em plantio direto a concentração ocorreu até 20 cm.

Duruoha (2000), estudando o sistema radicular de cana-de-açúcar em função da compactação e da classe de solo, concluiu que o Nitossolo Vermelho Distrófico apresentou desenvolvimento do sistema radicular reduzido quanto à densidade de comprimento (cm.cm^{-3}), volume e massa de matéria seca; ainda, notou que o Latossolo Vermelho Escuro proporcionou menores diâmetros médios radicular (mm), maior densidade do comprimento radicular (cm.cm^{-3}) e maior volume radicular (cm^3).

O pé de galinha (*Eleusine coracana* L.) tem sistema radicular agressivo e profundo atuando como agente descompactador, eliminando a maior densidade do solo e aumentando a sua macroporosidade (MARONEZZI; LUCAS, 2000).

Queiroz-Voltan et al. (2000), comparando duas cultivares de soja (IAC-8 e IAC-14) e quatro níveis de densidade do solo (0,95; 1,20; 1,35 e 1,50 Mg.m^{-3}) em vasos, num solo classificado como Latossolo Roxo, concluíram que a compactação do solo não afetou a estrutura anatômica da raiz em nenhuma das duas cultivares. Na cultivar IAC-8, o número de folhas, a altura das plantas e o peso da matéria seca da raiz e do caule diminuíram com o aumento da densidade do solo e o comprimento da raiz aumentou. Na cultivar IAC-14, o número de folhas, a área foliar, o número de vagens, a altura das plantas, o peso da matéria seca da raiz, do caule e das folhas foram diminuindo à medida que aumentou a densidade do solo. Os resultados sugerem que os dois cultivares podem ser bem adaptados a solos compactados nos níveis analisados.

O aumento do nível de densidade do solo resulta em menor comprimento da raiz primária das plântulas de milho (SANTOS, 2000).

Silva et al. (2000), analisando o sistema radicular do milho em Podzólico Vermelho-Amarelo sobre os sistemas de plantios direto e convencional, observaram que a distribuição das raízes foi maior no sistema convencional de solo.

Guimarães e Moreira (2001), verificando a compactação do solo na cultura de arroz de terras altas, notaram que as raízes na camada compactada de 0-20 cm de profundidade apresentam engrossamento em razão do aumento da densidade do solo e a compactação superficial do solo diminui a quantidade de raízes presentes nesta camada.

Duruoha (2003), comparando o sistema radicular de cana-de-açúcar de quatro variedades (RB72-454, SP80-1842, RB85-5536 e SP81-3250), em quatro níveis de compactação do solo (1,25; 1,35; 1,45 e 1,55 Mg.m⁻³) e dois teores de água (70 e 90 % da capacidade de campo) em Latossolo Vermelho Álico, concluiu que a variedade RB85-5536 apresentou maior desenvolvimento radicular em relação as demais mesmo em condição de maior compactação. As variedades RB72-454 e SP81-3250 apresentaram baixa sensibilidade à compactação do solo o que refletiu em aumento do crescimento radicular abaixo da camada compactada. Observou também, que a menor disponibilidade de água reduziu o crescimento radicular, provocando o engrossamento das raízes.

4.5 Cobertura vegetal e a compactação do solo

A colza (*Brassica napus* cv. Primor) e o tremço branco (*Lupinus albus*) são promissores para a utilização na recuperação de solos degradados, pois suas raízes pivotantes penetram nos solos compactados com resistência à penetração de 11 Kg.cm⁻² (CINTRA; MIELNICZUK, 1983).

Nuernberg et al. (1986), estudando o efeito de sucessão de culturas (milheto + feijão-miúdo / aveia + ervilhaca / milho / aveia + trevo-vermelho, milho / tremço-branco / milho / aveia + trevo-branco + pensacola, alfafa / aveia / feijão / aveia e feijão / alho / feijão / ervilha / milho / ervilhaca) e tipos de adubação (sem adubação, adubação mineral, adubação organomineral e adubação orgânica) em Terra Roxa Estruturada, concluíram que o tamanho dos agregados, densidade do solo, porosidade total e microporosidade não se diferiram estatisticamente.

Arihara et al. (1991 citados por ALVARENGA, 1993), comentaram que as raízes das leguminosas ao se decomporem, funcionam como condicionadores orgânicos do solo; ainda relataram que o crescimento radicular da soja e do milho quando cultivados em sucessão ao guandu, apresentam raízes mais profundas que cresceram através dos canais deixados pelas raízes do guandu, na camada compactada do solo.

A crotalária juncea e o guandu melhoram a qualidade física de um Latossolo Roxo, no que diz respeito a porosidade total e a densidade do solo (BONI; ESPINDOLA,1991).

Miranda et al. (1991), observaram que a crotalária juncea e o guandu foram mais sensíveis à compactação do solo do que o feijão de porco, com relação ao crescimento radicular; e as plantas de guandu e feijão de porco sofreram redução na massa de matéria seca da parte aérea em consequência do aumento da densidade do solo.

Alvarenga et al. (1995), analisando sete adubos verdes: caupi, crotalária juncea, crotalária paulina, guandu, feijão-bravo-do-ceará, feijão-de-porco, lab-lab e mucuna-preta observaram que o guandu foi a espécie com maior potencial para penetração de raízes no solo; as crotalárias e o caupi mostraram-se como sendo as espécies mais sensíveis a compactação do solo, concentrando suas raízes mais à superfície.

Alvarenga et al. (1996), verificando o crescimento de raízes de leguminosas (Crotalária juncea, guandu, feijão de porco, feijão branco do ceará e mata pasto) em camadas de solo compactadas artificialmente, concluíram que as leguminosas com exceção do mata pasto tiveram os sistemas radiculares reduzidos dentro da camada compactada e abaixo dela, além de apresentarem um acúmulo de raízes no anel superior do vaso, à medida que o nível de compactação aumenta. O mata pasto sobressaiu como a espécie com maior potencial para crescer em camadas compactadas de solo.

Foloni (1999), estudando cinco adubos verdes (guandu, guandu anão, mucuna preta, lab-lab e a crotalária juncea) em função da compactação do solo, verificou que a crotalária juncea mostrou um grande potencial como descompactadora do solo, pois foi a espécie com maior densidade de comprimento radicular na camada compactada. A mucuna preta apresentou, tanto o maior volume radicular, como o maior acúmulo de matéria seca de raízes abaixo da camada compactada, mostrando seu potencial em aumentar a aeração do solo.

Gonçalves (1999), analisando três espécies de adubos verdes (milheto, nabo forrageiro e tremoço branco) cultivados no inverno sob cultivo convencional e plantio direto em Terra Roxa Estruturada, concluiu que houve maior resistência à penetração na camada superficial do solo no plantio direto, sendo que os valores de densidade do solo não mostraram diferenças estatísticas entre os tratamentos.

Müller et al. (1999), avaliaram cinco espécies vegetais utilizadas como adubos verdes de inverno (aveia preta, aveia branca, nabo forrageiro, ervilhaca e tremoço branco), concluindo que as gramíneas e o nabo forrageiro mostraram maior potencial para crescer em camadas compactadas.

Pace et al. (1999), estudando cinco adubos verdes (milheto, sorgo de guiné, girassol, crotalaria juncea e crotalaria spectabilis) submetidos a quatro níveis de compactação do solo, observaram que o aumento da densidade do solo reduziu significativamente o acúmulo de matéria seca, volume e comprimento radicular.

A semeadura direta do milho “safrinha” com o cultivo prévio do milheto, em Latossolo Roxo Distrófico, proporciona melhor desenvolvimento vegetal e melhoria nas características físicas do solo, principalmente na densidade do solo, em relação ao cultivo prévio da aveia e de teosinte (ROSA JÚNIOR, 2000).

A rotação de culturas do feijoeiro irrigado, cultivar IAC-carioca com milho e adubos verdes (aveia-preta, crotalaria juncea L., guandu e mucuna preta) em Latossolo Vermelho Eutroférico, favoreceu a redução da resistência do solo à penetração na camada arável, garantindo a manutenção do teor de matéria orgânica do solo, bem como possibilitando a redução da acidez e o aumento do índice de saturação por bases em profundidade em relação ao teor inicial (WUTKE et al., 2000).

Silva et al. (2002a), estudando o crescimento radicular da soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo, concluíram que o cultivo anterior com aveia-preta, guandu e milheto favoreceu o crescimento radicular da soja abaixo das camadas compactadas (1,12; 1,36 e 1,60 Mg.m⁻³) de um solo classificado com Latossolo Vermelho.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Material

5.1.1 Localização da área experimental

O experimento foi conduzido no campo do Departamento da Engenharia Rural, da Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP, Campus de Botucatu/SP, ocupando uma área de 18 m², no período compreendido entre Novembro de 2002 à Fevereiro de 2003.

A localização geográfica é definida pelas coordenadas 22°49'41'' de Latitude Sul e 48°25'37'' de Longitude Oeste GRW e altitude média de 770 metros.

5.1.2 Espécies utilizadas

Amaranto (*Amaranthus cruentus*, variedade BRS Alegria), leguminosa com sistema radicular pivotante. Semeado em Novembro com 40% de poder germinativo (Figura 1); foram colocadas 10 sementes em cada vaso e após a germinação, fez-se desbaste para 1 planta por vaso.

Milheto (*Pennisetum glaucum* (L.), variedade BN-2), gramínea com sistema radicular fasciculado. Semeado em Novembro com 70% de poder germinativo (Figura 2); foram colocadas 28 sementes em cada vaso e após a germinação, fez-se desbaste para 14 plantas por vaso (MILHETO, 1997 e CALEGARI, 2002).

Pé de galinha (*Eleusine coracana* L.), gramínea com sistema radicular fasciculado. Semeado em Novembro com 63% de poder germinativo (Figura 3); foram colocadas 30 sementes em cada vaso e após a germinação, fez-se desbaste para 14 plantas por vaso.



Figura 1 Amarantho cultivado em quatro densidades.



Figura 2 Milheto cultivado em quatro densidades.



Figura 3 Pé de galinha cultivado em quatro densidades.

5.1.3 Solos

Os solos utilizados foram classificados como Terra Roxa Estruturada e Latossolo Vermelho Escuro, por Carvalho et al. (1983). De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 1999), estes solos passaram a ter nomenclatura de Nitossolo Vermelho Distroférico, de textura muito argilosa e Latossolo Vermelho Distrófico, de textura média, respectivamente. Estes foram coletados na profundidade de 0-20 cm na Fazenda Experimental Lageado da Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP, Campus de Botucatu/SP.

Os resultados das análises químicas e granulométricas deste experimento estão descritos nos Quadros 1 e 2, segundo metodologia proposta por Raij e Quaggio (1983) e Kiehl (1979), respectivamente.

Os solos coletados foram secos ao ar livre durante três dias e passados em peneira de malha de quatro milímetros. Em seguida, foram acondicionados em sacos plásticos pesando 10,5 Kg de solo cada, para posteriormente ser corrigido o teor de água.

Quadro 1 Resultados das análises químicas do Nitossolo Vermelho Distroférico (NVD) e do Latossolo Vermelho Distrófico (LVD).

Solos	pH	MO	P resina	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V
	CaCl ₂	g/dm ³	mg/dm ³			mmol _c /dm ³				%
NVD	5,2	26	38	42	3,7	43	20	67	109	61
LVD	4,3	27	2	64	0,8	15	6	23	87	26

Quadro 2 Resultados das análises granulométricas do Nitossolo Vermelho Distroférico (NVD) e do Latossolo Vermelho Distrófico (LVD).

Solos	AMG	AG	AM	AF	AMF	Areia/T	Argila	Silte	Textura
	g/Kg								
NVD	4	10	25	47	32	119	637	244	muito argilosa
LVD	15	52	242	265	98	672	261	67	média

5.1.4 Calagem e adubação

No Nitossolo Vermelho Distroférrico não foi colocado calcário e tampouco adubado, devido a sua composição química. Portanto, todos os cálculos de calagem e adubação foram feitos para que o Latossolo Vermelho Distrófico atingisse sua composição química.

Foi adicionado 1,6 g/l de solo de calcário dolomítico (PRNT = 90%) ao solo com o objetivo de elevar a saturação por base a 61%, segundo metodologia proposta por Raij et al. (1996). A adubação antes da semeadura foi constituída de 183,2 mg/dm³ de fósforo na forma de super triplo e 226,6 mg/dm³ de potássio na forma de cloreto de potássio.

Após receber calcário, adubação fosfatada e potássica no Latossolo Vermelho Distrófico, fez-se a correção do teor de água em ambos os solos; posteriormente foram acondicionados em sacos plásticos vedados e permaneceram umedecidos por 30 dias.

Durante a condução do experimento foram realizadas duas adubações nitrogenadas com 1,11 g de nitrogênio por vaso na forma de uréia aos 15 e 45 dias após a semeadura.

5.1.5 Tratos culturais

Fez-se o uso de inseticida-formicida granulado Blitz (Fibronil) ao redor do experimento com o objetivo de amenizar o ataque de formigas saúvas às plantas de amaranto. Utilizou-se também tela cercado e protegendo o experimento, evitando-se, assim, a invasão de animais (Figura 4).



Figura 4 Tela cercando e protegendo o experimento.

5.1.6 Aparelho de Proctor

No estudo da compactação do solo, foi utilizado o ensaio de laboratório Proctor Normal. Plotando os valores do teor de água versus densidade do solo, consegue-se a curva de compactação da qual são obtidas a umidade crítica de compactação e a densidade do solo máxima correspondente.

O aparelho é constituído de um extrator de amostra, cilindro metálico e colar complementar, base de engate do cilindro, parafusos de fixação, soquete de 2,5 Kg e talhador de amostra.

Para o Nitossolo Vermelho Distroférico o teor de água crítico de compactação foi de 30 % e a densidade do solo máxima correspondente foi de $1,51 \text{ Mg.m}^{-3}$ (Figura 5). No caso do Latossolo Vermelho Distrófico os valores ficaram em 15 % e $1,78 \text{ Mg.m}^{-3}$, respectivamente (Figura 6).

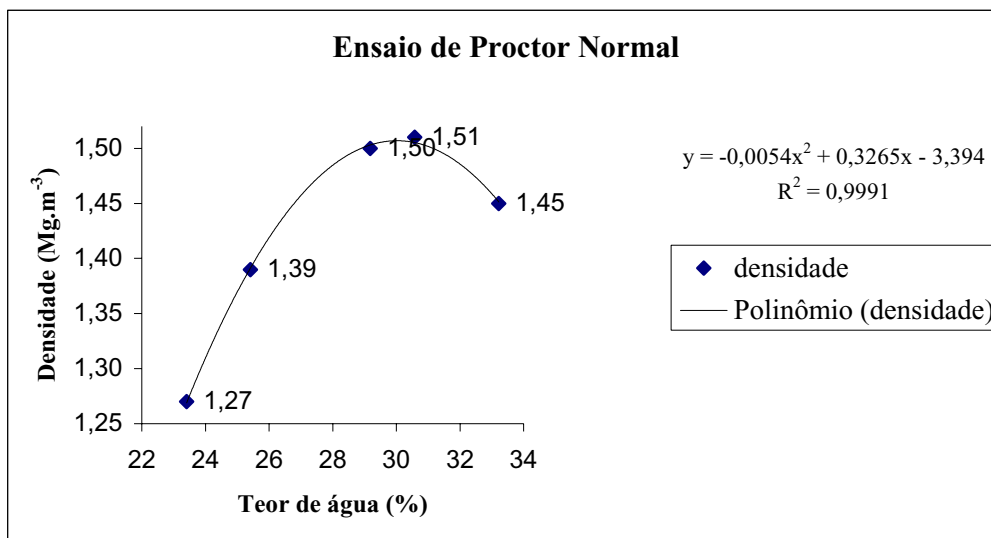


Figura 5 Curva de compactação para o Nitossolo Vermelho Distroférico.

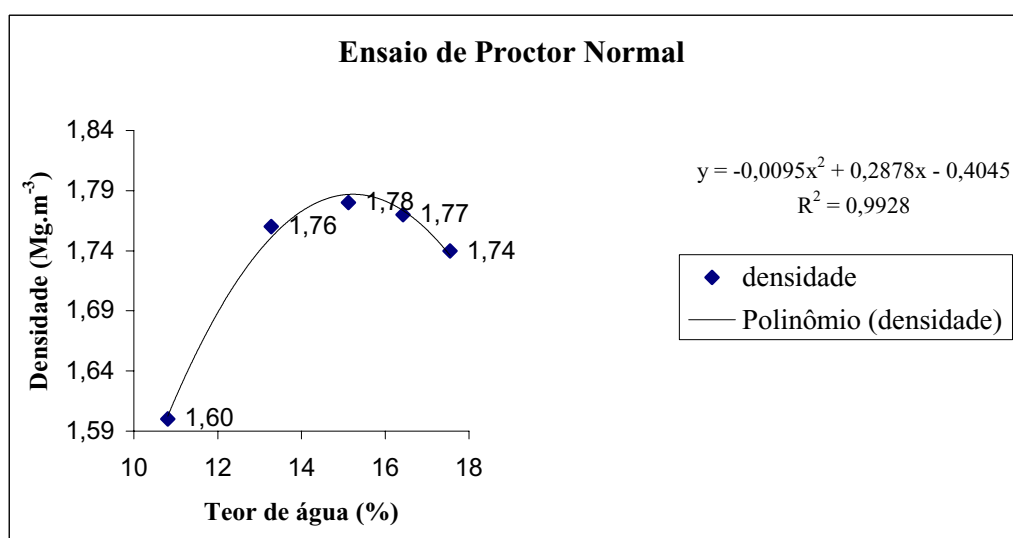


Figura 6 Curva de compactação para o Latossolo Vermelho Distrófico.

5.1.7 Prensa hidráulica

A prensa hidráulica da marca EMIG, modelo PHS 15-L, apresenta uma coluna de barra rosqueada em aço carbono ABNT 1040, estruturas superior e inferior de vigas em U com aço ABNT 1020. A adaptação da prensa constituiu-se em uma ponteira de aço com 30 cm de comprimento e 5,0 cm de diâmetro, com rosca interna para acoplamento ao eixo central do macaco hidráulico, e uma chapa de aço circular com 19 cm de diâmetro e 0,10 cm de espessura, fixada na extremidade da ponteira.

Para suportar os anéis de PVC rígido preenchidos com terra e assim evitar deformações indesejadas, foi utilizado um suporte de aço cilíndrico com 30 cm de altura e 20,5 cm de diâmetro interno.

O sistema de prensagem constitui-se de macaco hidráulico, acionado manualmente através de alavanca com capacidade de 3.000 KN.m^{-2} .

A força aplicada é determinada por um relógio registrador de força com capacidade para 50 KN.

5.1.8 Penetrômetro

Para medir a resistência do solo à penetração das raízes, foi utilizado um penetrômetro de bolso da marca DIK, modelo 679 (base do cone de 18 mm, altura do cone 40 mm e ângulo do vértice do cone de 23°) com leitura em quilograma por centímetro quadrado.

5.1.9 Anéis de PVC

No experimento foram utilizados para formar cada vaso com 40 cm de altura, quatro anéis de PVC rígido sobrepostos, com diâmetro interno de 19,5 cm e 10 cm de altura cada anel. Desta forma, para 96 vasos foram necessários 384 anéis.

5.2 Métodos

5.2.1 Delineamento experimental

O experimento foi constituído de 24 tratamentos com quatro repetições sendo um arranjo fatorial (2 x 3 x 4) equivalente as duas classes de solo (Latossolo Vermelho Distrófico e Nitossolo Vermelho Distroférico), três culturas (amaranto, milho e pé de galinha) e quatro densidades do solo (1,21; 1,31; 1,41 e 1,51 Mg.m⁻³) no delineamento de blocos ao acaso.

5.2.2 Correção do teor de água

Com os solos secos e pesando 10,5 Kg, foi feita a correção do teor de água baseado nos valores obtidos nos ensaios de Proctor Normal.

Após a homogeneização dos solos com o teor de água ótimo para compactação, segundo Silva (1998)¹, estes foram acondicionados em sacos plásticos e vedados para não desidratarem antes de serem prensados.

5.2.3 Compactação dos solos

Os solos foram novamente pesados, visando atingir o peso de 8,5 Kg; o restante foi separado para posteriormente ser usado na montagem das colunas de PVC. Depois, foi colocado em dois anéis de PVC sobrepostos, onde foi acomodado com um soquete

¹ SILVA, M.T.DA. (Lab. De Mecânica do solo, Dept. Eng. Rural, Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP – Campus de Botucatu). Comunicado pessoal, 1998.

manual e colocado no cilindro de aço da prensa hidráulica para ser compactado; portanto, padronizou-se 20 cm de coluna de terra para todas as prensagens e para a montagem dos vasos utilizou-se apenas o anel inferior.

Ambos os solos foram prensados para atingirem densidades com valores de 1,21; 1,31; 1,41 e 1,51 Mg.m^{-3} . Após a compactação, foi determinada a resistência à penetração mecânica do solo com o auxílio do penetrômetro de bolso, onde se efetuou seis leituras para cada anel (Quadro 3). Posteriormente, os anéis de PVC foram mantidos em sacos plásticos vedados até serem transferidos para o campo, onde foram montados os vasos.

Quadro 3 Resistência do solo à penetração.

Densidade do solo (Mg.m^{-3})	LVE (Kg/cm^2)	NVD (Kg/cm^2)
1,21	4,3	9,8
1,31	5,6	12,9
1,41	7,5	13,8
1,51	12,3	17,3

LVE - latossolo vermelho distrófico; NVE - nitossolo vermelho distroférico

5.2.4 Montagem e remoção dos vasos

No local do ensaio, cada vaso foi montado com quatro anéis de PVC rígido sobrepostos, correspondendo à camada superior (CS), camada compactada (CC) e camadas inferiores (A e B), totalizando 40 cm de altura (Figura 7). Os anéis foram unidos com fita adesiva transparente e a parte inferior dos vasos (fundo) foi mantida aberta para evitar encharcamento do solo.

Os vasos foram preenchidos com solo até 38 cm de altura, deixando-se vazio dois centímetros para facilitar o manejo da irrigação. Estes comportaram um volume de 12,56 litros de solo, sendo que, somente um anel foi compactado, correspondendo à profundidade de 10 a 20 cm.

Os vasos assim montados, previamente numerados e identificados, foram enterrados no campo do Departamento de Engenharia Rural, totalizando uma área de

18 m². Semeados num mesmo dia, fez-se bordadura para cada cultura e montou-se um sistema de irrigação por aspersão para suprir a necessidade de água em 40 mm por semana (Figura 8).

Os vasos foram desenterrados (Figura 9) na fase da inflorescência de cada cultura com o auxílio de um enxadão e de uma vanga. Primeiramente foi separada a parte aérea das plantas do sistema radicular. A seguir, os vasos foram desmontados, e os anéis correspondentes as camadas foram igualmente separados e identificados.

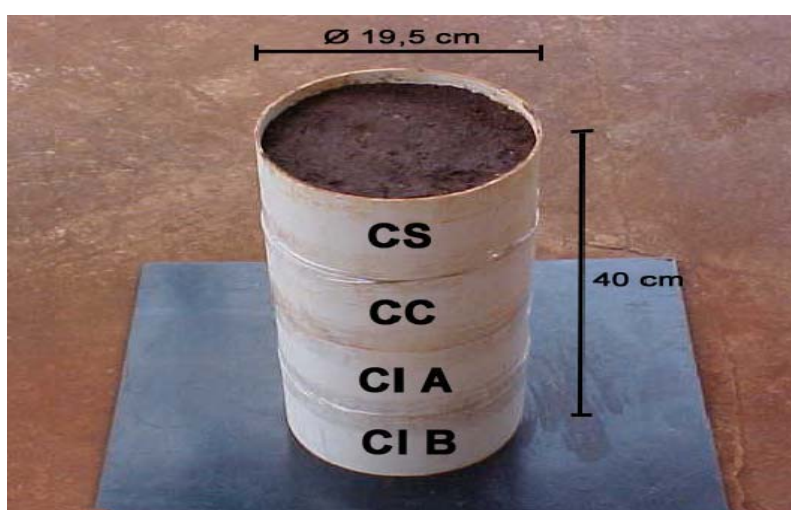


Figura 7 Vaso montado com quatro anéis de PVC.



Figura 8 Bordadura e sistema de irrigação para a cultura do pé de galinha.

5.2.5 Avaliação da parte aérea

As espécies foram cortadas rente à superfície dos solos e as partes aéreas foram medidas utilizando-se uma trena para determinar suas alturas (m); os tecidos vegetais foram desidratados em estufa a 70°C por 72 horas e seus pesos secos (g) foram obtidos em balança eletrônica.

5.2.6 Avaliação do sistema radicular

O sistema radicular foi lavado em água corrente sobre peneira de malha de um milímetro (Figura 10), permanecendo dividido em quatro partes (Figura 11) de acordo com as camadas de cada vaso e posteriormente colocado em sacos plásticos previamente numerados. Em seguida, foram pesados em balança eletrônica e por apresentarem grande volume foram retiradas alíquotas representativas de 5 %.

Essas alíquotas foram armazenadas em recipientes plásticos (Figura 12), submersas em solução aquosa contendo 30 % de álcool etílico, sendo conservadas em refrigerador para posteriormente serem submetidas à leitura pelo Scanner, modelo Scanjet 4C/T, marca HP; através do programa Win Mac Rhizo, versão 3.8-b determinou-se o comprimento (cm.cm^{-3}), o diâmetro (mm) e o volume (cm^3) radicular; as raízes restantes foram desidratadas em estufa a 70°C por 72 horas e suas massas (g) foram determinadas em balança eletrônica.

Através das massas secas das alíquotas e do total das massas secas radiculares, determinou-se o comprimento, o diâmetro e o volume de todo o sistema radicular para cada camada do vaso.



Figura 9 Remoção do vaso.



Figura 10 Lavagem do sistema radicular sobre peneira.



Figura 11 Sistema radicular lavado e dividido em quatro partes.



Figura 12 Sistema radicular armazenado em recipiente plástico.

5.2.7 Análise estatística

Os resultados foram analisados estatisticamente em relação à análise de variância, com teste de Tukey para comparar as médias entre espécies, solos e densidades e os desdobramentos das interações entre esses três fatores. O nível de significância para os testes foi de 5 % de probabilidade. Utilizou-se para análise, o programa estatístico SAS (Statistical Analysis System).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Morfologia radicular

6.1.1 Comprimento radicular

No Quadro 4 observa-se que, em todas as camadas dos vasos, houve diferenças significativas entre as espécies estudadas. Nas camadas superior e inferior (B) dos vasos, os comprimentos radiculares do pé de galinha e do milho foram estatisticamente maiores ao do amaranho. Já, na camada compactada todas as espécies diferiram-se estatisticamente entre si, sendo que o pé de galinha apresentou comprimento radicular superior comparado com as demais plantas.

A classe de solo alterou significativamente a variável em todas as camadas dos vasos (Quadro 4), com o Latossolo Vermelho Distrófico proporcionando maior desenvolvimento do sistema radicular em relação ao Nitossolo Vermelho Distroférico.

Quadro 4 Médias com indicações das comparações efetuadas pelo teste de Tukey. Quadrados médios e indicações de significância estatística obtidos nas análises de variância do comprimento radicular (cm.cm^{-3}) em função das espécies, classes de solo e densidades nas quatro camadas dos vasos.

Fontes de variação	Comprimento radicular (cm.cm^{-3})			
	CS	CC	CI A	CI B
Espécies (E)				
Pé de galinha	17,43 A	9,65 A	4,12 A	2,40 A
Milheto	15,69 A	6,47 B	2,43 AB	2,51 A
Amaranto	1,98 B	0,71 C	1,69 B	0,86 B
Solos (S)				
LVD	16,27 A	6,17 A	3,84 A	3,15 A
NVD	7,13 B	5,05 B	1,65 B	0,70 B
Densidades (D)				
1,21	8,10 C	6,01 AB	2,99 A	2,21 A
1,31	8,81 BC	6,97 A	2,82 A	1,57 A
1,41	16,10 A	5,01 B	2,50 A	1,69 A
1,51	13,79 AB	4,46 B	2,68 A	2,23 A
Espécies (E)	2292,54 *	656,73 *	49,82 *	27,11 *
Solos (S)	2002,51 *	30,27 *	114,78 *	143,90 *
Densidades (D)	360,52 *	29,50 *	1,01 ns	2,85 ns
E x S	424,96 *	33,54 *	6,62 ns	46,92 *
E x D	134,84 *	17,15 *	9,70 ns	9,25 ns
S x D	189,86 *	14,62 *	1,92 ns	0,07 ns
E x S x D	67,74 ns	10,79 ns	3,96 ns	11,69 *
Médias	11,70	5,61	2,75	1,92
CV (%)	58,76	39,80	111,52	106,19

(*) significativo; ns – não significativo; CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B - camadas inferiores. Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade.

Com relação à densidade do solo (Quadro 4), as plantas foram significativamente comprometidas em seu desenvolvimento com o aumento da densidade, somente nas camadas superior e compactada. Na camada superior, a variável foi maior nas densidades 1,41 e 1,51 Mg.m^{-3} (Figura 13), onde as raízes não conseguiram ultrapassar a camada compactada do solo, devido ao aumento da resistência à penetração das raízes, ficando

retidas nesta camada. Nas densidades 1,21 e 1,31 Mg.m^{-3} , as raízes atravessaram a camada compactada e atingiram as camadas inferiores (A e B), mostrando sua capacidade de penetrar em solos com estas densidades (Figura 13).

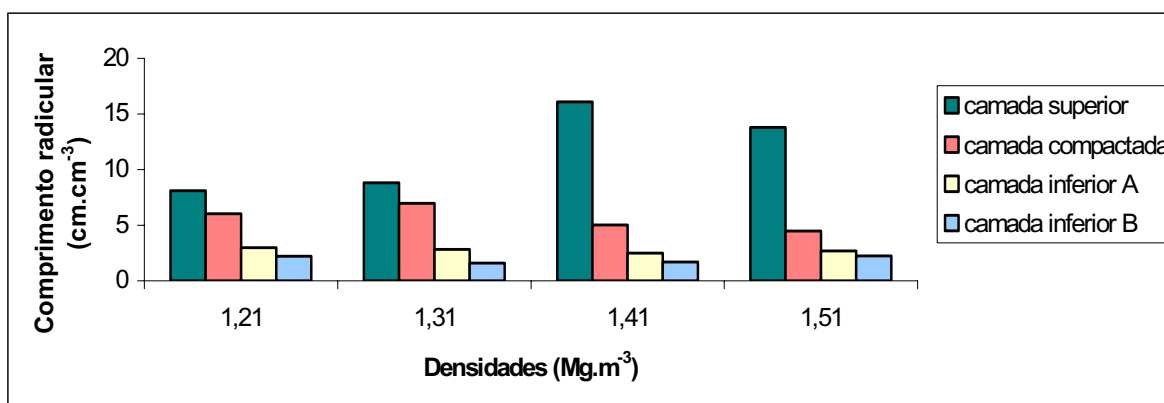


Figura 13 Comprimento radicular (cm.cm^{-3}) das espécies em função das densidades do solo para as diversas camadas dos vasos.

No Quadro 4 verifica-se, também, que houve interação entre as classes de solo e as espécies em quase todas as camadas dos vasos, com exceção da camada inferior (A). Em todas as espécies, o comprimento radicular foi maior no Latossolo Vermelho Distrófico do que no Nitossolo Vermelho Distroférrico (Quadro 5), devido ao maior teor de argila neste solo; a granulometria demonstra que o teor de argila é um dos componentes do solo que interfere na resistência à penetração das raízes (SAINI; CHOW, 1984 e MORAES et al., 1995).

Em todas as camadas do vaso no Latossolo Vermelho Distrófico (Quadro 5), nota-se que os comprimentos radiculares do pé de galinha e do milho foram estatisticamente superiores ao do amaranho; já, no Nitossolo Vermelho Distroférrico a situação se repete somente nas camadas superior e compactada. Nas camadas inferiores (A e B) não ocorreram diferenças estatísticas entre as espécies, em virtude da maior resistência à penetração das raízes neste solo.

Quadro 5 Desdobramento da interação classes de solo versus espécies referente ao comprimento radicular (cm.cm^{-3}) nas quatro camadas dos vasos.

Solos x Espécies	Comprimento radicular (cm.cm^{-3})			
	CS	CC	CI A	CI B
LVD x pé de galinha	25,29 A	11,37 A	5,15 A	4,64 A
LVD x milheto	20,87 A	6,24 B	4,01 AB	4,06 A
LVD x amaranto	2,63 B	0,91 C	2,36 B	0,75 B
NVD x pé de galinha	9,57 A	7,93 A	3,10 A	0,17 A
NVD x milheto	10,50 A	6,70 A	0,85 A	0,95 A
NVD x amaranto	1,32 B	0,52 B	1,01 A	0,98 A

LVD – latossolo vermelho distrófico; NVD – nitossolo vermelho distroférico; CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B - camadas inferiores. Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade.

Também se observa que houve interação entre as densidades e as espécies apenas nas camadas superior e compactada (Quadro 4). Nota-se que o pé de galinha nas densidades 1,21; 1,31 e 1,41 Mg.m^{-3} penetrou suas raízes na camada compactada e atingiu as camadas inferiores (A e B), demonstrando um grande potencial como descompactador do solo (Figura 14). Algumas pesquisas demonstraram a existência de plantas com sistema radicular agressivo atuando como descompactadoras do solo, é o caso da colza de inverno e do tremoço branco citados por Cintra e Mielniczuk (1983), do guandu pesquisado por Alvarenga et al. (1995), do mata pasto citado também por Alvarenga et al. (1996), da crotalária juncea observada por Foloni (1999), do nabo forrageiro descrito por Müller et al. (1999) e do pé de galinha citado por Maronezzi e Lucas (2000).

As raízes do pé de galinha na densidade de 1,51 Mg.m^{-3} ficaram concentradas nas camadas superior e compactada (Figura 14) não conseguindo atravessá-las para alcançar as camadas inferiores; desta forma, fica evidente que o aumento da densidade do solo causa diminuição no comprimento das raízes. Esta observação está de acordo com os resultados apresentados por Hallmark e Barber (1981), Borges et al. (1988) e Khalilian et al. (1991) para a soja; também por Vespraskas e Waggoner (1990), Rosolem et al. (1999) e Santos (2000) para o milho.

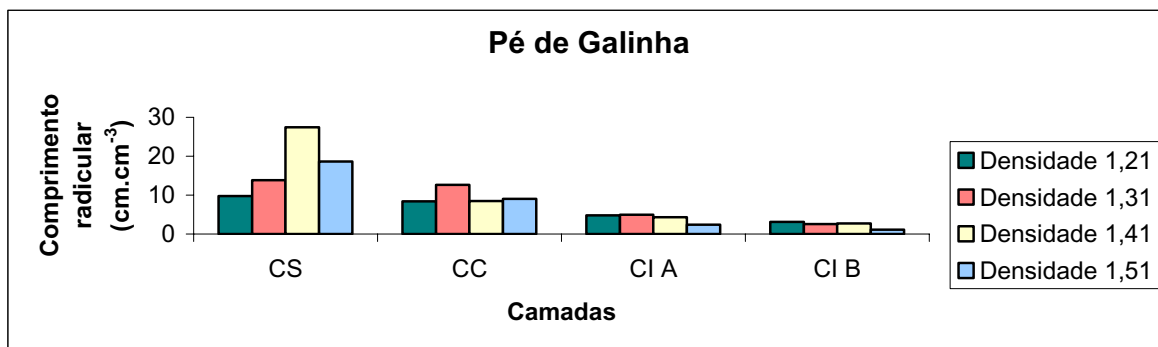


Figura 14 Comprimento radicular (cm.cm⁻³) do pé de galinha em função das camadas dos vasos (CS - camada superior; CC - camada compactada; CI A e CI B - camadas inferiores) para diversas densidades.

No caso do milho na densidade 1,21 Mg.m⁻³ suas raízes conseguiram penetrar na camada compactada e atingir as camadas inferiores (A e B); portanto, o comprimento radicular não se difere estatisticamente do pé de galinha (Quadro 6), mostrando esta planta um grande potencial como descompactador do solo nesta densidade. Nas densidades 1,31; 1,41 e 1,51 Mg.m⁻³ suas raízes ficaram praticamente retidas nas camadas superior e compactada, atingindo pouco as camadas inferiores (A e B), comparado ao pé de galinha (Figura 15); assim, fica determinado que o milho nestas densidades não age como descompactador do solo.

Nas camadas superior e compactada para todas as densidades e na camada inferior (A) nas densidades 1,21 e 1,31 Mg.m⁻³ observa-se que os comprimentos radiculares do pé de galinha e do milho foram estatisticamente superiores ao do amaranho (Quadro 6). Já, na camada inferior (B) os resultados também foram superiores, mas não se diferem estatisticamente. Verifica-se então, que o amaranho foi sensível à compactação do solo em todas as densidades estudadas, como pode ser observado na Figura 16.

De acordo com Whiteley e Dexter (1982), as culturas com raízes pivotante são mais afetadas pela compactação do solo que aquelas com raízes fasciculadas mais finas.

Quadro 6 Desdobramento da interação densidades versus espécies referente ao comprimento radicular (cm.cm^{-3}) nas quatro camadas dos vasos.

Densidades x Espécies	Comprimento radicular (cm.cm^{-3})			
	CS	CC	CI A	CI B
1,21 x pé de galinha	9,76 A	8,41 A	4,83 A	3,16 A
1,21 x milho	13,08 A	8,33 A	3,04 AB	2,70 A
1,21 x amaranto	1,45 B	1,29 B	1,09 B	0,78 A
1,31 x pé de galinha	13,88 A	12,64 A	4,94 A	2,60 A
1,31 x milho	10,76 A	7,64 B	2,26 AB	1,26 A
1,31 x amaranto	1,77 B	0,62 C	1,26 B	0,86 A
1,41 x pé de galinha	27,46 A	8,47 A	4,30 A	2,76 A
1,41 x milho	18,28 B	5,91 A	1,97 A	1,81 A
1,41 x amaranto	2,55 C	0,65 B	1,23 A	0,49 A
1,51 x Pé de galinha	18,61 A	9,08 A	2,42 A	1,09 A
1,51 x Milho	20,63 A	4,01 B	1,95 A	1,70 A
1,51 x Amaranto	2,13 B	0,29 C	1,20 A	0,48 A

CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B - camadas inferiores. Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade.

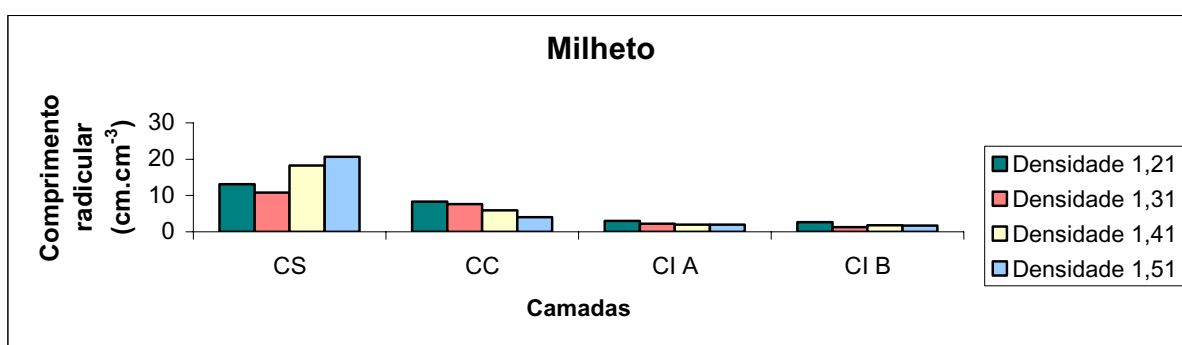


Figura 15 Comprimento radicular (cm.cm^{-3}) do milho em função das camadas dos vasos (CS - camada superior; CC - camada compactada; CI A e CI B - camadas inferiores) para diversas densidades.

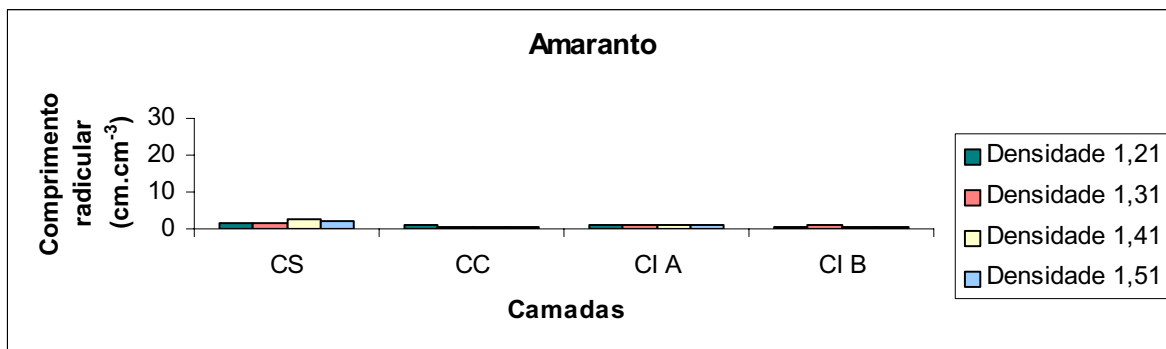


Figura 16 Comprimento radicular (cm.cm^{-3}) do amaranto em função das camadas dos vasos (CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B - camadas inferiores) para diversas densidades.

6.1.2 Diâmetro radicular

No Quadro 7 observa-se que houve diferença significativa entre as espécies somente nas camadas superior e inferior (B). Já, nas camadas compactada e inferior (A) não ocorreram diferenças significativas nem estatísticas entre as espécies. Na camada superior, o pé de galinha foi estatisticamente superior ao milho e ao amaranto; na camada inferior (B), o amaranto foi estatisticamente superior ao pé de galinha e ao milho. Nota-se que o diâmetro radicular apresentou maior valor na camada superior para todas as espécies; nas demais camadas este valor diminui gradativamente.

A classe de solo alterou significativamente a variável em todas as camadas dos vasos, com exceção da camada inferior (A), sendo que o Latossolo Vermelho Distrófico proporcionou maior diâmetro radicular em relação ao Nitossolo Vermelho Distroférrico (Quadro 7).

Para a densidade do solo (Quadro 7) houve diferença significativa somente na camada superior. Nesta camada, para as densidades 1,21 e 1,31 Mg.m^{-3} o diâmetro radicular diferiu-se estatisticamente das densidades 1,41 e 1,51 Mg.m^{-3} , havendo uma tendência das raízes a engrossarem com o aumento da densidade. Para as demais camadas, as densidades não se diferiram estatisticamente entre si, mas nota-se também que o diâmetro radicular apresentou maior valor na camada superior para todas as densidades; nas demais camadas este valor diminui gradativamente.

Quadro 7 Médias com indicações das comparações efetuadas pelo teste de Tukey. Quadrados médios e indicações de significância estatística obtidos nas análises de variância do diâmetro radicular (mm) em função das espécies, classes de solo e densidades nas quatro camadas dos vasos.

Fontes de variação	Diâmetro radicular (mm)			
	CS	CC	CI A	CI B
Espécies (E)				
Pé de galinha	0,25 A	0,15 A	0,10 A	0,07 B
Milheto	0,19 B	0,13 A	0,09 A	0,09 B
Amaranto	0,15 B	0,13 A	0,12 A	0,15 A
Solos (S)				
LVD	0,23 A	0,15 A	0,12 A	0,12 A
NVD	0,16 B	0,13 B	0,09 B	0,09 B
Densidades (D)				
1,21	0,17 B	0,15 A	0,09 A	0,12 A
1,31	0,18 B	0,14 A	0,11 A	0,09 A
1,41	0,24 A	0,14 A	0,13 A	0,12 A
1,51	0,24 A	0,12 A	0,10 A	0,08 A
Espécies (E)	0,76 *	0,02 ns	0,05 ns	0,49 *
Solos (S)	1,38 *	0,10 *	0,28 ns	0,32 *
Densidades (D)	0,22 *	0,02 ns	0,05 ns	0,11 ns
E x S	0,39 *	0,009 ns	0,05 ns	0,04 ns
E x D	0,04 ns	0,05 *	0,01 ns	0,12 ns
S x D	0,23 *	0,01 ns	0,007 ns	0,09 ns
E x S x D	0,08 ns	0,02 ns	0,009 ns	0,04 ns
Médias	0,20	0,14	0,11	0,10
CV (%)	37,08	29,18	52,55	77,24

(*) significativo; ns – não significativo; CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B - camadas inferiores. Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade.

No Quadro 7, verifica-se que houve interação entre as classes de solo e as espécies apenas na camada superior. Evidencia-se que nesta camada do Latossolo Vermelho Distrófico, o diâmetro radicular do pé de galinha foi estatisticamente superior ao milho e ao amaranço; já, para as demais camadas a variável não se diferiu estatisticamente entre as espécies (Quadro 8).

Para o Nitossolo Vermelho Distroférico, as espécies diferiram-se estatisticamente entre si somente na camada inferior (B); para as demais camadas não ocorreu diferenças estatísticas, isto se deve ao fato da maior resistência à penetração das raízes neste solo (Quadro 8).

Quadro 8 Desdobramento da interação classes de solo versus espécies referente ao diâmetro radicular (mm) nas quatro camadas dos vasos.

Solos x Espécies	Diâmetro radicular (mm)			
	CS	CC	CI A	CI B
LVD x pé de galinha	0,33 A	0,16 A	0,11 A	0,10 A
LVD x milheto	0,21 B	0,14 A	0,11 A	0,10 A
LVD x amaranto	0,16 B	0,14 A	0,15 A	0,16 A
NVD x pé de galinha	0,17 A	0,13 A	0,10 A	0,04 B
NVD x milheto	0,17 A	0,12 A	0,08 A	0,08 AB
NVD x amaranto	0,14 A	0,13 A	0,09 A	0,14 A

LVD – latossolo vermelho distrófico; NVD – nitossolo vermelho distroférico; CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B - camadas inferiores. Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade.

Em todas as camadas dos vasos, nota-se que o Latossolo Vermelho Distrófico propiciou maior valor de diâmetro radicular em relação ao Nitossolo Vermelho Distroférico (Quadro 7). Assim, pode-se afirmar que devido a maior resistência à penetração do Nitossolo, as raízes de todas as espécies diminuíram seus diâmetros para penetrar, mesmo que insuficiente, nas diversas camadas dos vasos.

No Quadro 9, observa-se que para a densidade $1,21 \text{ Mg.m}^{-3}$ as espécies não se diferiram estatisticamente nas camadas superior, compactada e inferior (A). Na camada superior, o pé de galinha foi a espécie que apresentou maior diâmetro; para as demais camadas o amaranto apresentou maior diâmetro radicular.

Na densidade $1,31 \text{ Mg.m}^{-3}$ não ocorreu diferença estatística nas diversas camadas dos vasos para todas as espécies; contudo, identifica-se que nas camadas superior e compactada, o pé de galinha obteve maior diâmetro radicular. Já, na camada inferior (A e B), o amaranto apresentou maior diâmetro (Quadro 9).

Na densidade $1,41 \text{ Mg.m}^{-3}$ da camada superior, o pé de galinha foi estatisticamente superior ao milho e ao amaranho. Para a camada inferior (B), o amaranho foi estatisticamente superior ao pé de galinha e ao milho; nas demais camadas não houve diferença estatística entre as espécies (Quadro 9).

Para a densidade $1,51 \text{ Mg.m}^{-3}$ em todas as camadas dos vasos, o pé de galinha obteve maior diâmetro comparado ao milho e ao amaranho (Quadro 9).

Quadro 9 Desdobramento da interação densidades versus espécies referente ao diâmetro radicular (mm) nas quatro camadas dos vasos.

Densidades x Espécies	Diâmetro radicular (mm)			
	CS	CC	CI A	CI B
1,21 x pé de galinha	0,20 A	0,13 A	0,09 A	0,06 B
1,21 x milho	0,17 A	0,14 A	0,09 A	0,11 AB
1,21 x amaranho	0,14 A	0,18 A	0,10 A	0,20 A
1,31 x pé de galinha	0,21 A	0,17 A	0,10 A	0,07 A
1,31 x milho	0,18 A	0,12 A	0,11 A	0,08 A
1,31 x amaranho	0,14 A	0,13 A	0,13 A	0,11 A
1,41 x pé de galinha	0,32 A	0,13 A	0,13 A	0,07 B
1,41 x milho	0,23 B	0,13 A	0,09 A	0,10 B
1,41 x amaranho	0,16 B	0,15 A	0,16 A	0,20 A
1,51 x pé de galinha	0,26 A	0,15 A	0,11 A	0,09 A
1,51 x milho	0,19 AB	0,13 AB	0,09 A	0,08 A
1,51 x amaranho	0,15 B	0,09 B	0,10 A	0,07 A

CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B - camadas inferiores. Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade.

Sendo assim, pode-se confirmar que o aumento da densidade do solo ocasionou diferenças no diâmetro radicular entre as espécies em todas as camadas dos vasos. A camada compactada obstruiu o crescimento do sistema radicular das plantas, contribuindo no aumento do diâmetro do mesmo.

6.1.3 Volume radicular

O volume radicular é uma variável dependente do diâmetro radicular e do comprimento radicular total; assim, pode-se afirmar que esta é uma variável compensatória, ou seja, as espécies que apresentam pequeno comprimento radicular, mas com alto diâmetro de raízes, podem obter o mesmo volume radicular que as espécies que apresentam um grande comprimento radicular e um pequeno diâmetro de raízes (FOLONI, 1999).

No Quadro 10 observa-se que houve diferenças significativas entre as espécies estudadas nas camadas superior, compactada e inferior (B). Nas camadas superior e compactada dos vasos, os volumes radiculares de todas as espécies diferiram-se estatisticamente entre si, sendo que o pé de galinha apresentou valores superiores as demais plantas. Já, na camada inferior (A), as espécies não diferiram estatisticamente entre si, mesmo assim, o pé de galinha mostrou volume radicular superior ao milho e ao amaranto.

A classe de solo modificou significativamente a variável em todas as camadas dos vasos (Quadro 10), onde o Latossolo Vermelho Distrófico proporcionou maior volume radicular em relação ao Nitossolo Vermelho Distroférrico.

Analisando o Quadro 10, pode-se afirmar que o aumento da densidade do solo influenciou significativamente o volume radicular das espécies nas camadas superior, compactada e inferior (B). Nas camadas superior e compactada, o volume radicular foi maior do que nas camadas inferiores (A e B), sendo que na camada superior a variável foi maior nas densidades 1,41 e 1,51 Mg.m^{-3} (Figura 17).

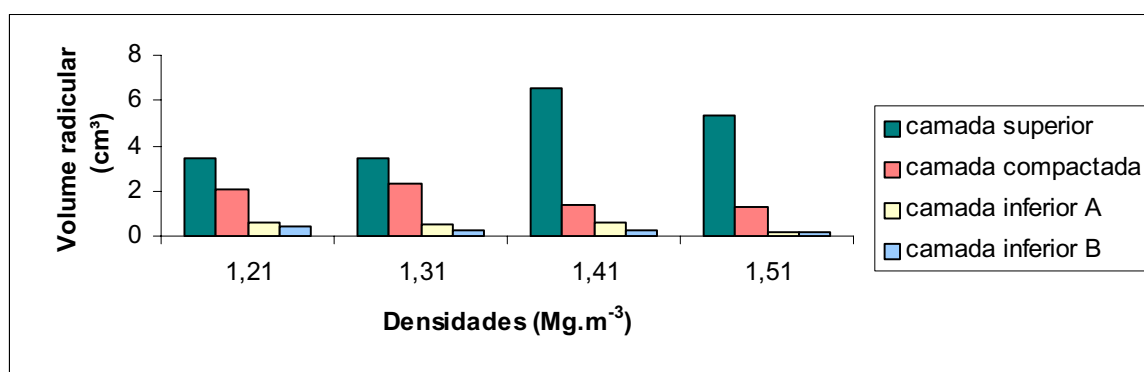


Figura 17 Volume radicular (cm^3) das espécies em função das densidades do solo para as diversas camadas dos vasos.

Quadro 10 Médias com indicações das comparações efetuadas pelo teste de Tukey. Quadrados médios e indicações de significância estatística obtidos nas análises de variância do volume radicular (cm³) em função das espécies, classes de solo e densidades nas quatro camadas dos vasos.

Fontes de variação	Volume radicular (cm ³)			
	CS	CC	CI A	CI B
Espécies (E)				
Pé de galinha	7,48 A	3,33 A	0,70 A	0,35 A
Milheto	5,92 B	1,72 B	0,37 A	0,24 AB
Amaranto	0,66 C	0,23 C	0,28 A	0,20 B
Solos (S)				
LVD	7,24 A	2,29 A	0,75 A	0,46 A
NVD	2,13 B	1,23 B	0,15 B	0,06 B
Densidades (D)				
1,21	3,48 BC	2,05 AB	0,56 A	0,39 A
1,31	3,42 C	2,31 A	0,49 A	0,25 AB
1,41	6,50 A	1,38 BC	0,56 A	0,25 AB
1,51	5,35 AB	1,30 C	0,19 A	0,16 B
Espécies (E)	40,91 *	7,66 *	0,16 ns	0,01 *
Solos (S)	62,71 *	2,72 *	0,84 *	0,37 *
Densidades (D)	5,41 *	0,59 *	0,07 ns	0,02 *
E x S	14,07 *	1,03 *	0,05 ns	0,04 *
E x D	2,42 *	0,27 *	0,05 ns	0,005 ns
S x D	5,68 *	0,12 ns	0,03 ns	0,01 *
E x S x D	2,08 *	0,13 ns	0,06 ns	0,007 ns
Médias	4,69	1,76	0,45	0,26
CV (%)	54,11	54,23	121,58	80,36

(*) significativo; ns – não significativo; CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B - camadas inferiores. Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade.

No Quadro 10 constata-se, ainda, que houve interação entre as classes de solo e as espécies nas camadas superior, compactada e inferior (B). Nota-se que nestas camadas do Latossolo Vermelho Distrófico, o volume radicular do pé de galinha foi estatisticamente superior ao milho e ao amaranho (Quadro 11); já, para a camada inferior (A) as espécies não diferiram estatisticamente umas das outras.

Para o Nitossolo Vermelho Distroférico, os volumes radiculares do pé de galinha e do milho foram estatisticamente superiores ao do amaranho nas camadas superior e compactada; já para as camadas inferiores (A e B), as espécies não se distinguiram estatisticamente (Quadro 11).

Em todas as camadas dos vasos, observa-se que o Latossolo Vermelho Distrófico apresentou maior valor de volume radicular em relação ao Nitossolo Vermelho Distroférico, sendo que o pé de galinha foi a espécie que mostrou maiores valores em ambos os solos.

Quadro 11 Desdobramento da interação classes de solo versus espécies referente ao volume radicular (cm³) nas quatro camadas dos vasos.

Solos x Espécies	Volume radicular (cm ³)			
	CS	CC	CI A	CI B
LVD x pé de galinha	11,88 A	4,52 A	1,14 A	0,68 A
LVD x milho	8,92 B	1,98 B	0,64 A	0,41 B
LVD x amaranho	0,93 C	0,39 C	0,46 A	0,29 B
NVD x pé de galinha	3,09 A	2,14 A	0,26 A	0,01 A
NVD x milho	2,92 A	1,47 A	0,10 A	0,08 A
NVD x amaranho	0,39 B	0,08 B	0,10 A	0,10 A

LVD – latossolo vermelho distrófico; NVD – nitossolo vermelho distroférico; CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B - camadas inferiores. Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade.

Constata-se também, que houve interação entre as densidades e as espécies apenas nas camadas superior e compactada (Quadro 10). Na camada superior, o pé de galinha e o milho foram estatisticamente superiores ao amaranho nas densidades 1,21; 1,31 e 1,51 Mg.m⁻³. Para a densidade 1,41 Mg.m⁻³ as espécies diferiram estatisticamente umas das outras, com o pé de galinha obtendo maior valor em relação ao milho e ao amaranho (Quadro 12).

Para a camada compactada, o pé de galinha e o milho foram estatisticamente superiores ao amaranho na densidade 1,21 Mg.m⁻³. Nas densidades 1,31 e 1,41 Mg.m⁻³ as espécies distinguiram estatisticamente entre si, sendo que o pé de galinha obteve

maior valor entre as plantas. Já, para a densidade $1,51 \text{ Mg.m}^{-3}$, o pé de galinha foi estatisticamente superior tanto ao milho como ao amaranho (Quadro 12).

Nas camadas inferiores (A e B), as espécies não se diferiram estatisticamente, mas nota-se que o pé de galinha obteve maior valor entre as mesmas (Quadro 12).

Quadro 12 Desdobramento da interação densidades versus espécies referente ao volume radicular (cm^3) nas quatro camadas dos vasos.

Densidades x Espécies	Volume radicular (cm^3)			
	CS	CC	CI A	CI B
1,21 x pé de galinha	4,44 A	3,19 A	0,77 A	0,46 A
1,21 x milho	4,54 A	2,56 A	0,54 A	0,35 A
1,21 x amaranho	0,46 B	0,40 B	0,37 B	0,36 A
1,31 x pé de galinha	5,55 A	4,74 A	0,71 A	0,38 A
1,31 x milho	4,19 A	1,92 B	0,34 A	0,15 A
1,31 x amaranho	0,52 B	0,28 C	0,40 B	0,22 A
1,41 x pé de galinha	11,89 A	2,55 A	0,70 A	0,39 A
1,41 x milho	6,62 B	1,39 B	0,24 A	0,22 A
1,41 x amaranho	0,98 C	0,20 C	0,23 A	0,13 A
1,51 x pé de galinha	8,05 A	2,83 A	0,15 A	0,16 A
1,51 x milho	7,34 A	1,03 B	0,34 A	0,26 A
1,51 x amaranho	0,66 B	0,05 B	0,11 A	0,07 A

CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B - camadas inferiores. Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade.

Desta forma, estes resultados permitem confirmar que o pé de galinha foi a espécie que apresentou volume radicular superior ao das demais espécies, mostrando um grande potencial em aumentar a aeração do solo (bioporos) em profundidade até a densidade $1,41 \text{ Mg.m}^{-3}$ (Figura 18). Já o milho, consegue aumentar a aeração do solo em profundidade até a densidade $1,21 \text{ Mg.m}^{-3}$, pois nas demais densidades, suas raízes ficaram concentradas nas camadas superior e compactada (Figura 19).

Afirma-se ainda, que os volumes radiculares do pé de galinha e do milho diminuem em função do aumento da densidade do solo. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Hallmark e Barber (1981) para a soja; por Foloni (1999) para a mucuna preta e Pace (1999) para o milho e o sorgo de guiné. O amaranto foi sensível ao aumento da densidade do solo em todas as densidades estudadas, como pode ser notado na Figura 20.

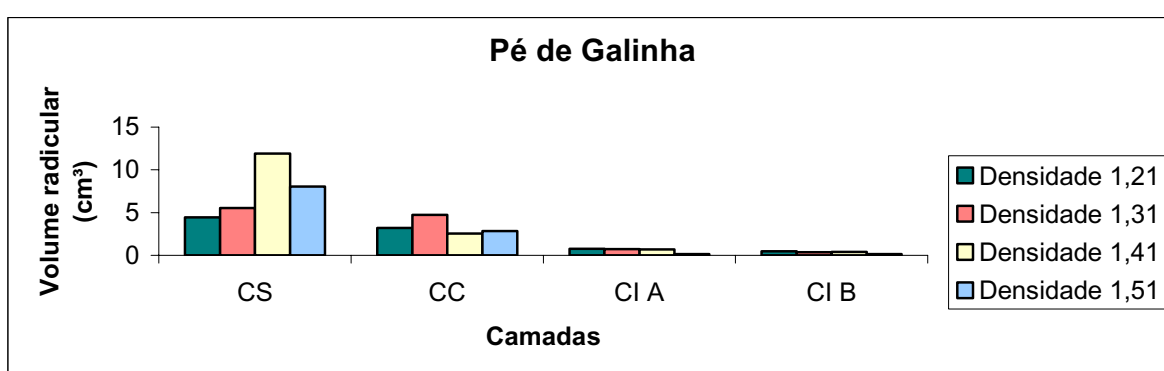


Figura 18 Volume radicular (cm^3) do pé de galinha em função das camadas dos vasos (CS - camada superior; CC - camada compactada; CI A e CI B - camadas inferiores) para diversas densidades.

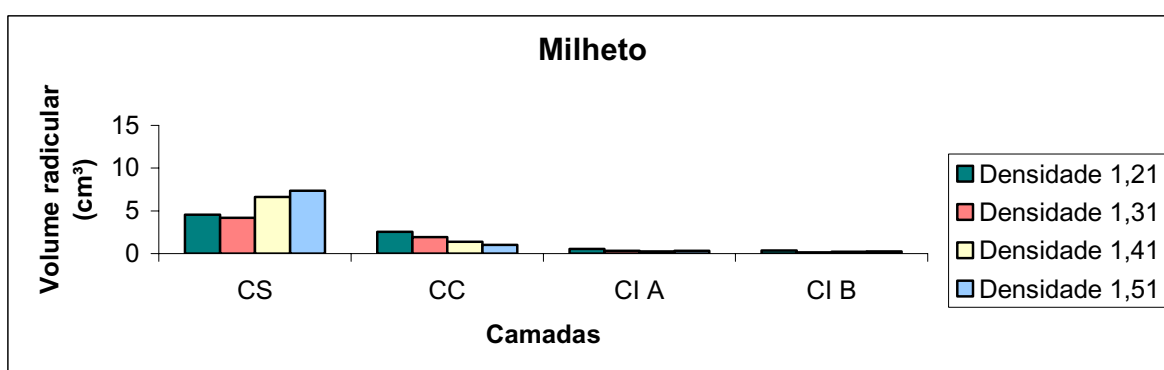


Figura 19 Volume radicular (cm^3) do milho em função das camadas dos vasos (CS – camada superior; CC - camada compactada; CI A e CI B - camadas inferiores) para diversas densidades.

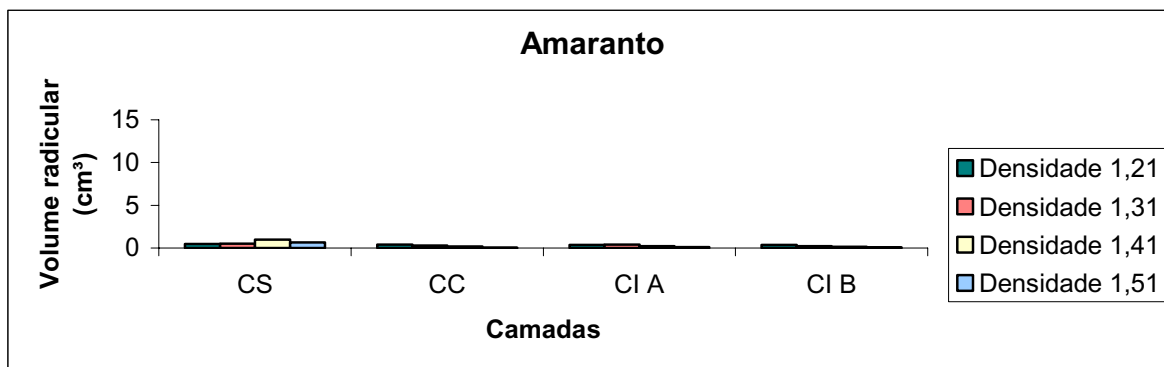


Figura 20 Volume radicular (cm^3) do amarantho em função das camadas dos vasos (CS - camada superior; CC - camada compactada; CI A e CI B - camadas inferiores) para diversas densidades.

6.1.4 Massa seca radicular

No Quadro 13, verifica-se que houve diferenças significativas na massa seca radicular entre as espécies nas camadas superior, compactada e inferior (A). Na camada superior, o pé de galinha e o milho foram estatisticamente superiores ao amarantho. Já, na camada compactada as espécies diferiram estatisticamente umas das outras, sendo que o pé de galinha apresentou massa seca radicular superior em comparação com as demais plantas. Nota-se, também, que nas camadas inferiores (A e B), as espécies não diferiram estatisticamente entre si.

A classe de solo alterou significativamente a variável em todas as camadas dos vasos (Quadro 13), onde o Latossolo Vermelho Distrófico proporcionou maior massa seca radicular em relação ao Nitossolo Vermelho Distroférrico, devido a menor resistência à penetração das raízes neste solo.

Com relação à densidade do solo (Quadro 13), ocorreu diferenças significativas somente nas camadas compactada e inferior (B). Nestas camadas, a quantidade de massa seca radicular foi maior nas densidades 1,21 e 1,31 Mg.m^{-3} . Na camada superior, mesmo não havendo diferenças estatísticas entre as densidades, a variável foi maior quando as densidades das camadas compactadas foram de 1,41 e 1,51 Mg.m^{-3} (Figura 21). Estes resultados mostram que a massa seca radicular foi sensível ao aumento da densidade do solo,

pois nas densidades 1,41 e 1,51 Mg.m^{-3} as raízes ficaram praticamente retidas na camada superior, não conseguindo penetrar na camada compactada (Figura 21).

Quadro 13 Médias com indicações das comparações efetuadas pelo teste de Tukey. Quadrados médios e indicações de significância estatística obtidos nas análises de variância da massa seca radicular (g) em função das espécies, classes de solo e densidades nas quatro camadas dos vasos.

Fontes de variação	Massa seca radicular (g)				
	CS	CC	CI A	CI B	Total
Espécies (E)					
Pé de Galinha	8,75 A	3,79 A	0,78 A	0,43 A	13,75 A
Milheto	8,28 A	2,03 B	0,43 A	0,31 A	11,05 B
Amaranto	1,21 B	0,43 C	0,41 A	0,35 A	2,40 C
Solos (S)					
LVD	9,05 A	2,78 A	0,93 A	0,66 A	13,42 A
NVD	3,12 B	1,38 B	0,15 B	0,07 B	4,72 B
Densidades (D)					
1,21	5,33 A	2,67 A	0,69 A	0,54 A	9,23 A
1,31	5,40 A	2,75 A	0,67 A	0,38 A	9,20 A
1,41	7,56 A	1,53 B	0,57 A	0,32 B	9,98 A
1,51	6,04 A	1,38 B	0,23 A	0,22 B	7,87 A
Espécies (E)	570,82 *	90,56 *	1,33 *	0,12 ns	1124,55 *
Solos (S)	844,71 *	47,09 *	14,28 *	8,43 *	1815,70 *
Densidades (D)	25,79 ns	12,78 *	1,09 ns	0,41 *	18,68 ns
E x S	154,09 *	10,89 *	0,45 ns	0,33 *	256,77 *
E x D	18,88 ns	3,79 *	0,39 ns	0,18 *	28,72 ns
S x D	69,70 *	2,34 ns	0,68 ns	0,35 *	46,88 *
V x E x D	19,46 ns	1,81 ns	0,42 ns	0,25 *	24,55 ns
Médias	6,08	2,08	0,54	0,37	9,08
C.V. (%)	51,69	46,99	118,01	66,37	42,07

(*) significativo; ns – não significativo; CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B - camadas inferiores. Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade.

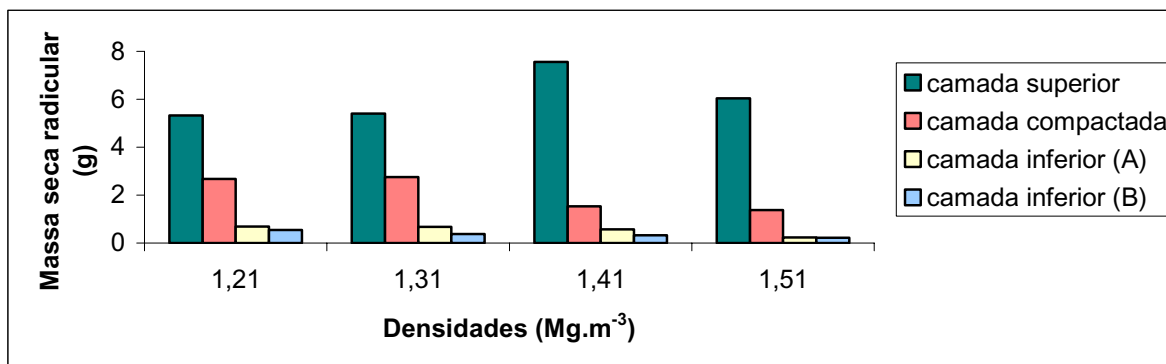


Figura 21 Massa seca radicular (g) das espécies em função das densidades do solo para as diversas camadas dos vasos.

No Quadro 13, constata-se, também, que houve interação entre as classes de solo e as espécies em quase todas as camadas dos vasos, com exceção da camada inferior (A). No Latossolo Vermelho Distrófico, o pé de galinha e o milho foram estatisticamente superiores ao amaranho na camada superior. Já, na camada compactada, as plantas diferiram estatisticamente umas das outras e nas camadas inferiores (A e B), o pé de galinha foi estatisticamente superior ao milho e ao amaranho (Quadro 14).

Para o Nitossolo Vermelho Distroférico, o pé de galinha e o milho foram estatisticamente superiores ao amaranho nas camadas superior e compactada. Já, para as camadas inferiores (A e B) não ocorreram diferenças estatísticas entre as espécies (Quadro 14). Por outro lado, nota-se que, em ambos os solos, a massa seca radicular do pé de galinha foi maior em comparação com as demais plantas, demonstrando um grande potencial em incorporar a matéria orgânica em profundidade, independentemente das condições do solo ao longo do perfil.

Observa-se, ainda, no Quadro 13, que houve interação entre as densidades e as espécies somente nas camadas compactada e inferior (B). Nota-se que o pé de galinha nas densidades 1,21; 1,31 e 1,41 Mg.m^{-3} obteve um grande acúmulo de massa seca radicular nas camadas compactada e inferiores (A e B), demonstrando um grande potencial como descompactador do solo, incorporando a matéria orgânica em profundidade (Figura 22). Na densidade 1,51 Mg.m^{-3} a variável ficou concentrada nas camadas superior e compactada,

confirmando, assim, que nesta densidade o pé de galinha foi sensível ao aumento da densidade do solo.

Segundo Osterroht (2002), plantas de cobertura com enraizamentos amplo e profundo promovem maior fluxo vertical da matéria orgânica, aumentando desta forma, sua estruturação, tornando o solo poroso.

Quadro 14 Desdobramento da interação classes de solo versus espécies referente a massa seca radicular (g) nas quatro camadas dos vasos.

Solos x Espécies	Massa seca radicular (g)				
	CS	CC	CI A	CI B	Total
LVD x Pé de galinha	13,55 A	5,17 A	1,30 A	0,85 A	20,87 A
LVD x Milheto	11,85 A	2,39 B	0,76 B	0,54 B	15,54 B
LVD x Amaranto	1,75 B	0,79 C	0,72 B	0,60 B	3,86 C
NVD x Pé de galinha	4,96 A	2,42 A	0,25 A	0,02 A	7,65 A
NVD x Milheto	4,71 A	1,66 A	0,10 A	0,08 A	6,55 A
NVD x Amaranto	0,68 B	0,06 B	0,11 A	0,10 A	0,95 B

LVD – latossolo vermelho distrófico; NVD – nitossolo vermelho distroférrico; CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B - camadas inferiores. Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade.

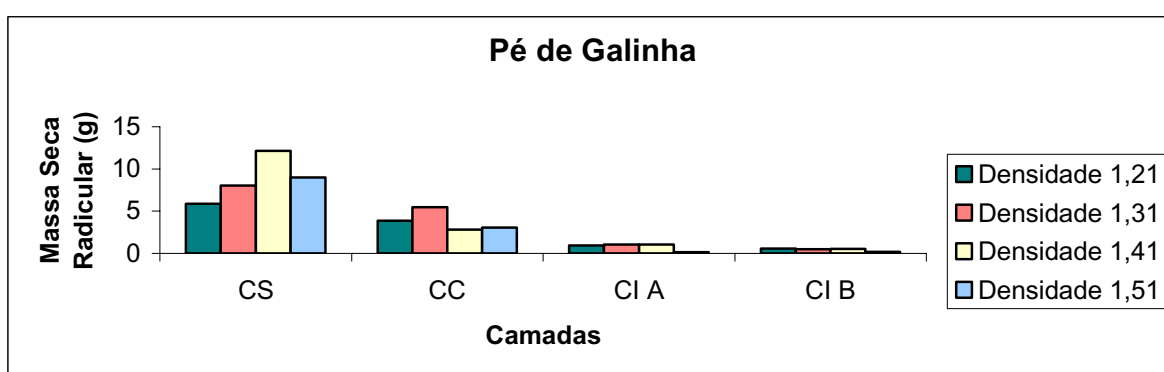


Figura 22 Massa seca radicular (g) do pé de galinha em função das camadas dos vasos (CS - camada superior; CC - camada compactada; CI A e CI B - camadas inferiores) para diversas densidades.

No Quadro 15, nota-se que no Latossolo Vermelho Distrófico todas as espécies apresentaram maior porcentagem de massa seca radicular abaixo da camada compactada, quando comparado ao Nitossolo Vermelho Distroférrico.

Quadro 15 Porcentagem de massa seca radicular referente as classes de solo versus as espécies nas quatro camadas dos vasos.

Solos x Espécies	Massa seca radicular (%)			
	CS	CC	CI A	CI B
LVD x pé de galinha	64,92	24,77	6,22	4,07
LVD x milho	76,25	15,37	4,89	3,47
LVD x amaranto	45,33	20,46	18,65	15,54
NVD x pé de galinha	64,83	31,63	3,26	0,26
NVD x milho	71,90	25,34	1,52	1,22
NVD x amaranto	71,57	6,31	11,57	10,52

LVD – latossolo vermelho distrófico; NVD – nitossolo vermelho distroférrico; CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B - camadas inferiores.

Na densidade $1,21 \text{ Mg.m}^{-3}$ observa-se que o milho obteve um grande acúmulo de massa seca radicular nas camadas compactada e inferiores (A e B), agindo como descompactador do solo, incorporando a matéria orgânica em profundidade (Figura 23). Nas densidades $1,31$; $1,41$ e $1,51 \text{ Mg.m}^{-3}$ a variável ficou retida nas camadas superior e compactada; afirma-se, desta forma, que nestas densidades o milho foi sensível ao aumento da densidade do solo.

Constata-se no Quadro 16, nas camadas superior e compactada para todas as densidades que a massa seca radicular tanto do pé de galinha como do milho foram estatisticamente superiores ao do amaranto. Já, nas camadas inferiores (A e B), os resultados também foram superiores, mas não se diferem estatisticamente. Destaca-se, assim, que o amaranto foi sensível à compactação do solo em todas as densidades estudadas, como pode ser analisado na Figura 24.

Quadro 16 Desdobramento da interação densidades versus espécies referente a massa seca radicular (g) nas quatro camadas dos vasos.

Densidades x Espécies	Massa seca radicular (g)				
	CS	CC	CI A	CI B	Total
1,21 x Pé de galinha	5,87 A	3,87 A	0,91 A	0,55 A	11,20 A
1,21 x Milheto	9,25 A	3,35 A	0,82 A	0,40 A	13,82 A
1,21 x Amaranto	0,87 B	0,80 B	0,53 A	0,66 A	2,86 B
1,31 x Pé de galinha	8,01 A	5,44 A	1,03 A	0,49 A	14,97 A
1,31 x Milheto	7,08 A	2,25 B	0,60 A	0,31 A	10,24 B
1,31 x Amaranto	1,12 B	0,57 C	0,60 A	0,43 A	2,72 C
1,41 x Pé de galinha	12,15 A	2,82 A	1,03 A	0,51 A	16,51 A
1,41 x Milheto	9,00 A	1,49 B	0,35 A	0,30 AB	11,14 B
1,41 x Amaranto	1,53 B	0,28 C	0,33 A	0,16 B	2,30 C
1,51 x Pé de galinha	8,98 A	3,04 A	0,13 A	0,18 A	12,33 A
1,51 x Milheto	7,80 A	1,02 B	0,36 A	0,34 A	9,52 A
1,51 x Amaranto	1,33 B	0,07 B	0,19 A	0,15 A	1,74 B

CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B - camadas inferiores. Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade.

Portanto, estes resultados permitem deduzir que o aumento da densidade do solo causa redução na massa seca radicular de todas as espécies estudadas. Estes resultados estão de acordo com citados por Benez et al. (1986), Borges et al. (1988), Moraes et al. (1991) e Rosolem et al. (1994a) para a soja; também com os observados por Foloni (1999) para a soja e cinco adubos verdes e por Pace et al. (1999) para o milheto e o sorgo de guiné.

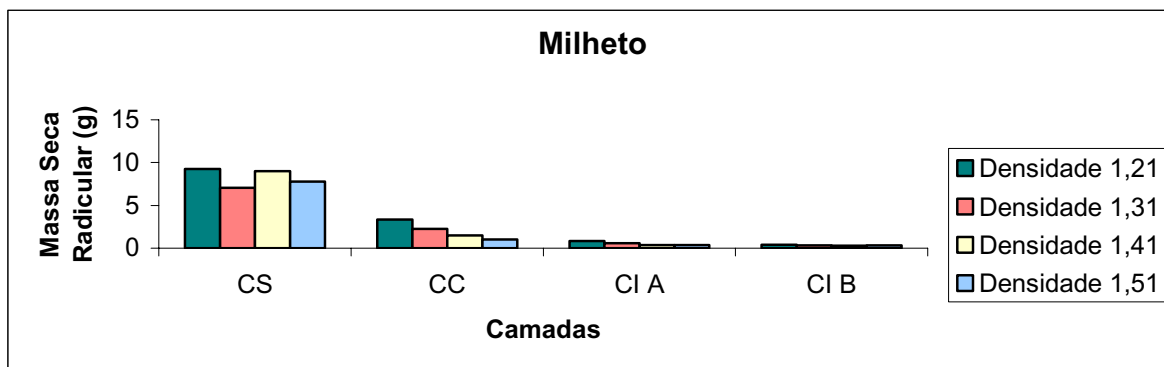


Figura 23 Massa seca radicular (g) do milho em função das camadas dos vasos (CS - camada superior; CC - camada compactada; CI A e CI B - camadas inferiores) para diversas densidades.

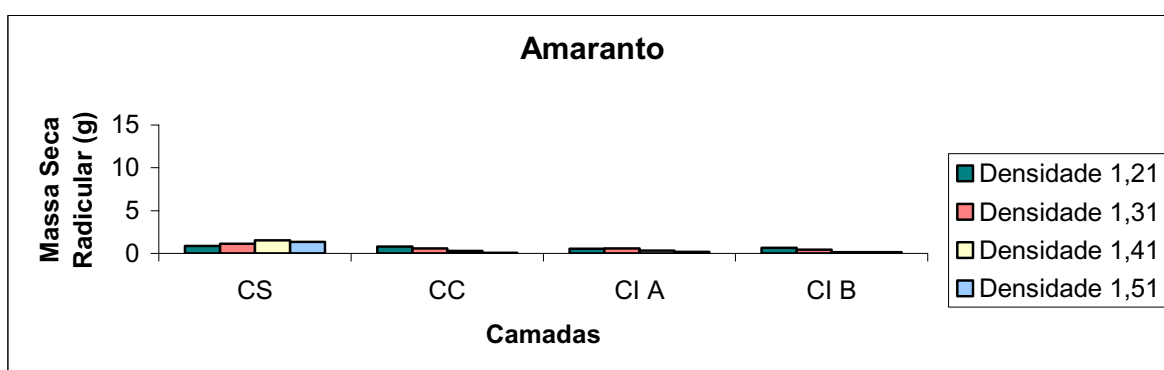


Figura 24 Massa seca radicular (g) do amaranto em função das camadas dos vasos (CS - camada superior; CC - camada compactada; CI A e CI B - camadas inferiores) para diversas densidades.

Observa-se no Quadro 17 que, o pé de galinha e o milho apresentaram maior porcentagem de massa seca radicular nas camadas superior e compactada para todas as densidades. Nota-se, também, que o pé de galinha nas densidades 1,21; 1,31 e 1,41 Mg.m^{-3} obteve a variável superior abaixo da camada compactada, em relação ao milho. O amaranto apresentou maior porcentagem de massa seca radicular nas camadas inferiores (A e B) para todas as densidades, em relação ao milho e ao pé de galinha, embora tenha sido a espécie com menor massa seca radicular (g) em todas as camadas dos vasos (Quadro 16).

Quadro 17 Porcentagem de massa seca radicular referente as densidades versus as espécies nas quatro camadas dos vasos.

Densidades x Espécies	Massa seca radicular (%)			
	CS	CC	CI A	CI B
1,21 x pé de galinha	52,41	34,55	8,12	4,91
1,21 x milho	66,93	24,24	5,93	2,89
1,21 x amaranto	30,41	27,97	18,53	23,07
1,31 x pé de galinha	53,50	36,33	6,88	3,27
1,31 x milho	69,14	21,97	5,85	3,02
1,31 x amaranto	41,17	20,95	22,05	15,80
1,41 x pé de galinha	73,54	17,08	6,23	3,08
1,41 x milho	80,78	13,37	3,14	2,69
1,41 x amaranto	66,52	12,17	14,34	6,95
1,51 x pé de galinha	72,83	24,65	1,05	1,45
1,51 x milho	81,93	10,71	3,78	3,57
1,51 x amaranto	76,43	4,02	10,91	8,62

CS – camada superior; CC – camada compactada; CI A e CI B - camadas inferiores.

6.2 Morfologia da parte aérea

6.2.1 Altura e massa seca da parte aérea

No Quadro 18 observa-se que ocorreu diferença significativa entre as espécies estudadas. As alturas das partes aéreas do milho e do amaranto foram estatisticamente superiores ao do pé de galinha, em virtude de serem plantas com maior desenvolvimento. O milho apresentou maior acúmulo de massa seca na parte aérea, diferindo-se estatisticamente do pé de galinha e do amaranto.

A classe de solo modificou significativamente a altura e a produção de massa seca da parte aérea, sendo que o Latossolo Vermelho Distrófico proporcionou estatisticamente maiores valores em relação ao Nitossolo Vermelho Distroférrico, em ambas as variáveis (Quadro 18).

Para a densidade do solo, também, houve diferença significativa em ambas as variáveis (Quadro 18). Nas densidades 1,21; 1,31 e 1,41 Mg.m⁻³ não ocorreu

diferença estatística na altura e na quantidade de massa seca da parte aérea das plantas, em função do aumento da compactação do solo (Quadro 18). Já, na densidade 1,51 Mg.m⁻³ as variáveis foram alteradas, ocorrendo redução na altura e na massa seca da parte aérea.

No Quadro 18 verifica-se que houve interação entre as classes de solo e as espécies para altura e acúmulo de massa seca da parte aérea das plantas.

Quadro 18 Médias com indicações das comparações efetuadas pelo teste de Tukey. Quadrados médios e indicações de significância estatística obtidos nas análises de variância da altura (m) e massa seca (g) da parte aérea em função das espécies, classes de solo e densidades.

Fontes de variação	Altura (m)	Massa seca (g)
Espécies (E)		
Pé de Galinha	0,37 B	36,97 B
Milheto	0,84 A	79,96 A
Amaranto	0,89 A	27,03 B
Solos (S)		
LVD	0,91 A	72,63 A
NVD	0,49 B	23,34 B
Densidades (D)		
1,21	0,76 A	54,65 A
1,31	0,75 A	54,48 A
1,41	0,71 AB	49,90 AB
1,51	0,58 B	32,91 B
Espécies (E)	2,61 *	25332,09 *
Solos (S)	4,25 *	58321,40 *
Densidades (D)	0,16 *	2539,72 *
E x S	0,54 *	5773,40 *
E x D	0,04 ns	1048,57 ns
S x D	0,08 ns	1453,89 ns
E x S x D	0,20 *	1914,24 *
Médias	0,70	47,99
C.V. (%)	28,03	53,30

(*) significativo; ns – não significativo. Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade.

Em todas as espécies, as variáveis foram maiores no Latossolo Vermelho Distrófico do que no Nitossolo Vermelho Distroférico (Quadro 19). Duruoha (2000), observou que na cana de açúcar este resultado é provavelmente reflexo do desenvolvimento radicular. Assim, pressupõe-se que o maior desenvolvimento radicular, constatado neste solo, proporcionaria a planta melhor nutrição e absorção de água, refletindo diretamente na síntese de fotoassimilados e conseqüentemente na produção de massa seca.

No Quadro 19, verifica-se que o milho e o amaranho, em ambos os solos, apresentaram estatisticamente maior altura da parte aérea em relação ao pé de galinha, observa-se melhor estes resultados na Figura 25.

A quantidade de massa seca da parte aérea do milho foi estatisticamente superior ao do pé de galinha e do amaranho, em ambos os solos (Quadro 19), notando-se melhor estas diferenças na Figura 26; estes resultados mostram o milho como sendo uma planta que apresenta melhores características que as outras duas para o plantio direto, que requer sempre uma grande quantidade de massa seca na superfície do solo. Deve-se ressaltar que não ocorreram diferenças estatísticas na altura da parte aérea do milho e do amaranho (Quadro 18).

Quadro 19 Desdobramento da interação classes de solo versus espécies referente a altura (m) e massa seca (g) da parte aérea das plantas.

Solos x Espécies	Altura (m)	Massa seca (g)
LVD x pé de galinha	0,46 B	59,89 B
LVD x milho	1,19 A	118,82 A
LVD x amaranho	1,08 A	39,19 B
NVD x pé de galinha	0,28 C	14,05 B
NVD x milho	0,49 B	41,10 A
NVD x amaranho	0,70 A	14,86 B

LVD – latossolo vermelho distrófico; NVD – nitossolo vermelho distroférico. Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade.

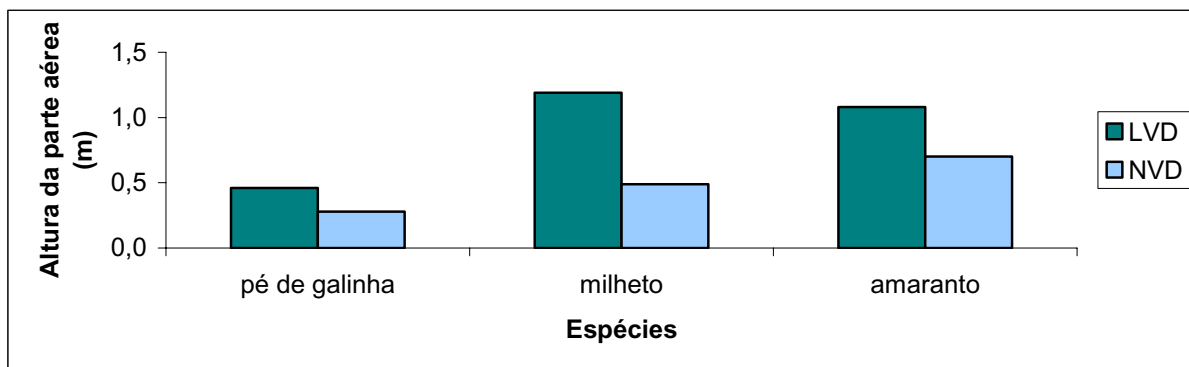


Figura 25 Altura da parte aérea (m) das três espécies versus as classes de solo (LVD – latossolo vermelho distrófico; NVD – nitossolo vermelho distroférrico).

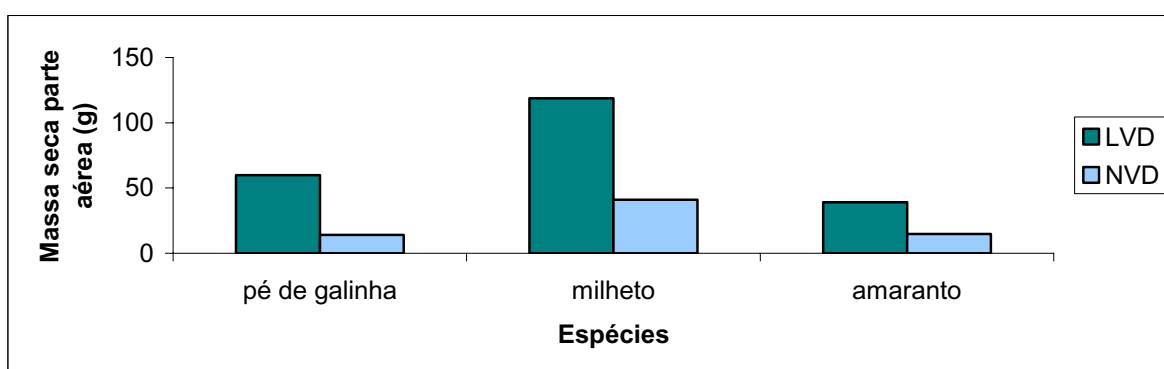


Figura 26 Massa seca da parte aérea (g) das três espécies versus as classes de solo (LVD – latossolo vermelho distrófico; NVD – nitossolo vermelho distroférrico).

Também se observa que não houve interação entre as densidades e as espécies para altura e massa seca da parte aérea das plantas (Quadro 18). Por outro lado, nota-se que estatisticamente o milho e o amaranth apresentaram a altura da parte aérea superior ao do pé de galinha para todas as densidades (Quadro 20). Já, para a quantidade de massa seca, o milho foi estatisticamente superior ao pé de galinha e ao amaranth em todas as densidades, chegando a apresentar o dobro da massa (Quadro 20).

Quadro 20 Desdobramento da interação densidades versus espécies referente a altura (m) e a massa seca (g) da parte aérea das plantas.

Densidades x Espécies	Altura (m)	Massa seca (g)
1,21 x pé de galinha	0,40 B	43,22 B
1,21 x milho	0,98 A	105,99 A
1,21 x amaranto	1,00 A	34,74 B
1,31 x pé de galinha	0,39 B	44,63 B
1,31 x milho	0,88 A	81,97 A
1,31 x amaranto	1,00 A	36,85 B
1,41 x pé de galinha	0,40 B	41,42 B
1,41 x milho	0,80 A	76,94 A
1,41 x amaranto	0,93 A	31,33 B
1,51 x pé de galinha	0,35 B	28,59 AB
1,51 x milho	0,69 A	54,96 A
1,51 x amaranto	0,71 A	15,19 B

Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade.

A altura da parte aérea do pé de galinha permaneceu uniforme em todas as densidades do solo (Figura 27). No caso do milho e do amaranto, o aumento da compactação do solo diminuiu a altura média das plantas (Figura 27). Esta observação está de acordo com os resultados obtidos por Ortolani et al. (1982) e Queiroz-Voltan et al. (2000), para a soja e por Vespraskas e Waggoner (1990), para o milho.

A quantidade de massas secas do pé de galinha, do milho e do amaranto, mesmo não sendo significativa, também diminuem com o aumento da compactação do solo (Figura 28). Resultados semelhantes, também, foram encontrados por Foloni (1999) para a soja e cinco adubos verdes: guandu, guandu anão, mucuna preta, lab-lab e crotalária juncea; ainda por Müller et al. (1999) para cinco adubos verdes: aveia preta, aveia branca, nabo forrageiro, ervilhaca e tremoço branco e também por Pace et al. (1999) para cinco adubos verdes: milho, sorgo de guiné, girassol, crotalária juncea e crotalária spectabilis.

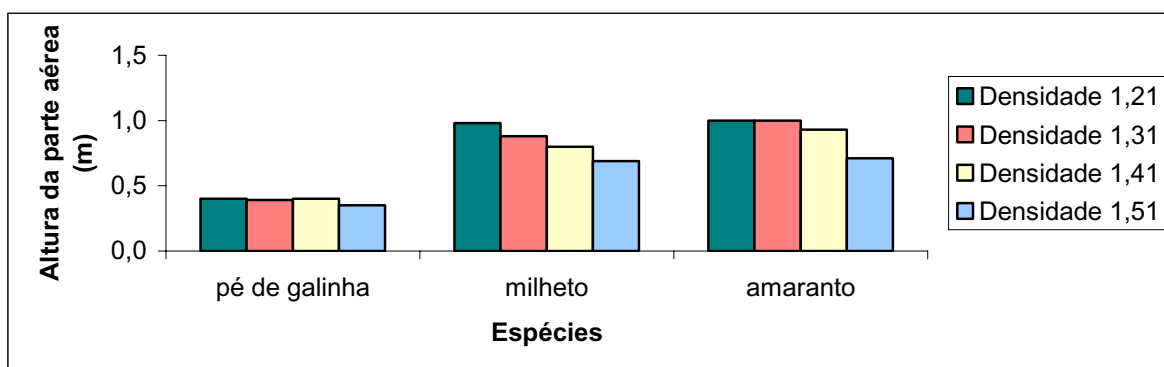


Figura 27 Altura da parte aérea (m) das espécies em função das densidades do solo.

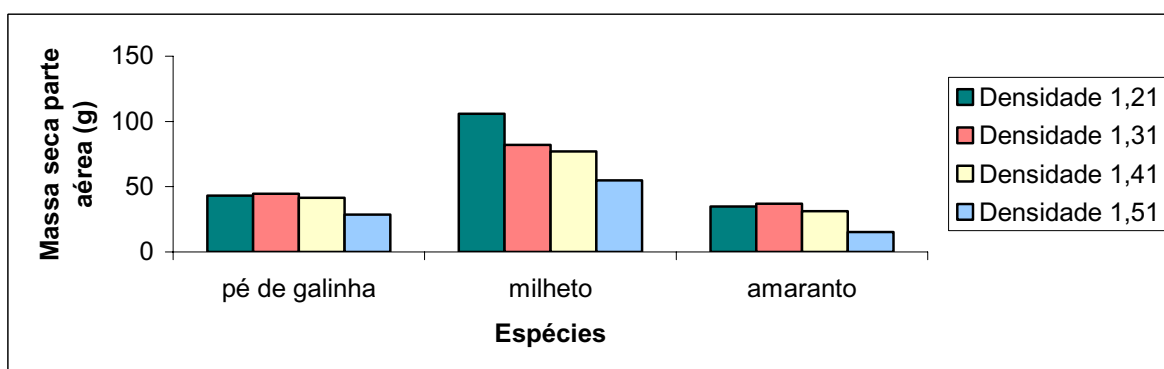


Figura 28 Massa seca da parte aérea (g) das espécies em função das densidades do solo.

7 CONCLUSÕES

Nas condições em que o experimento foi conduzido e com base nos resultados obtidos conclui-se:

O pé de galinha apresentou, em relação ao amaranto e ao milheto, o sistema radicular com maior comprimento, volume e massa seca, penetrando nas camadas compactadas dos solos até a densidade $1,41 \text{ Mg.m}^{-3}$;

O milheto proporcionou maior quantidade de massa seca na parte aérea em ambos os solos, mostrando ter melhor característica para cobertura do solo, quando comparado ao amaranto e ao pé de galinha;

O amaranto foi mais sensível à compactação dos solos em todas as densidades e variáveis estudadas quando comparado ao milheto e ao pé de galinha;

O Latossolo Vermelho Distrófico propiciou melhor condição de desenvolvimento das plantas em estudo, por apresentar menor resistência à penetração das raízes quando comparado ao Nitossolo Vermelho Distroférrico.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, J.A. et al. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.19, n.1, p.115-119, 1995.

ALVARENGA, R.C. **Potencialidades de adubos verdes para conservação e recuperação de solos**. 1993.111f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Viçosa, 1993.

ALVARENGA, R.C. et al. Características de alguns adubos verdes de interesse para a conservação e recuperação de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.30, n.2, p.175-185, fev. 1995.

ALVARENGA, R.C. et al. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, n.1, p.219-226, 1996.

ANJOS, J.T. et al. Propriedades físicas em solos sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.18, n.1, p.139-145, 1994.

AVIDSSON, J.; HAKANSSON, I. A model for estimating crop yield losses caused by compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.20, n.1, p.319-332, 1991.

BENEZ, S.H.; GAMERO, C.A.; FURLANI JÚNIOR, J.A. Efeitos da compactação do solo no desenvolvimento do sistema radicular de plantas de soja. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 15., 1986, São Paulo. **Resumos...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1986. p.45.

BENNIE, A.T.P. Growth and mechanical impedance. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (Ed.). **Plant roots: the hidden half**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1996. 1002 p.

BONI, N.R.; ESPINDOLA, C.R. Uso de leguminosas na recuperação de um solo degradado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 23., 1991, Porto Alegre. **Programas e Resumos...** Campinas: SBCS, 1991.

BORGES, E.N. et al. Respostas de variedades de soja à compactação de camadas de solo. **Revista Ceres**, Viçosa, v.35, n.202, p.553-568, 1988.

BORGES, E.N. et al. Efeito de calcário e gesso nos teores de cálcio e alumínio da camada compactada em Latossolo Vermelho-Escuro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.32, n.12, p.1309-1315, dez. 1997.

BRADY, N.C. **Natureza e propriedades dos solos**. 6 ed. São Paulo, 1983. p. 51-54.

CALEGARI, A. Rotação de culturas e uso de plantas de cobertura. **Agroecologia**, Botucatu, ano 2, n.14, p.14-19, maio/jun. 2002.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/USP, 1997. 132 p.

CARVALHO, W.A.; ESPÍNDOLA, C.R.; PACCOLA, A.A. Levantamento de solos da Fazenda Lageado – Estação Experimental “Presidente Médici”. **Boletim Científico da Faculdade de Ciências Agronômicas**. UNESP Botucatu, n.1, p.1-95, 1983.

CENTURION, J.F.; DEMATTÊ, J.L.I. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.9, n.3, p.263-266, 1985.

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, n.1, p.197-201, 1983.

COSTA, F.S.de. **Propriedades físicas e produtividade de culturas de um Latossolo Bruno sob sistemas de manejo em experimento de longa duração**. 2001.98f.Tese (Mestrado em Ciências do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Disponível em: < <http://www.capes.gov.br> >. Acesso em: 14out.2002.

DERPSCH, R. et al. **Controle da erosão no Paraná, Brasil**: sistema de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Eschborn: GTZ, 1991. 272 p.

DIAS JUNIOR, M. de S.; PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, n.1, p.175-182, 1996.

DURUOHA, C.; **Desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) em função da compactação, do teor de água e do tipo de solo**. 2000. 109f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.

DURUOHA, C.; **Desenvolvimento radicular de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) em função da compactação e da disponibilidade hídrica**. 2003. 110f. Tese (Doutorado em

Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação, 1999. 412 p.

FANTE JÚNIOR, L. et al. Distribuição do sistema radicular de uma cultura de aveia forrageira. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.56, n.4, p.1091-1100,1999.

FARIA, C.D.de. **Avaliação das características químicas, físicas e biológicas de um Latossolo Vermelho-Escuro submetido a diferentes sistemas de manejo**. 2001.83f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás. Disponível em: < <http://www.capes.gov.br> >. Acesso em: 14out.2002.

FERNANDES, B. et al. Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição dos poros, em dois solos (Typic argiaquoll e Typic hapludalf). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, n.1, p.329-333, 1983.

FERNANDES, E.M. et al. Matéria seca e nutrição da soja em razão da compactação do solo e adubação fosfatada. **Científica**, São Paulo, v.23, n.1, p.117-132, 1995.

FERREIRA, E.B. **Efeitos de compactações, conteúdo de água e fontes de carbono e nitrogênio, na aeração do solo**.1997.50p.Tese (Mestrado em Tecnologia Energéticas Nucleares) – Universidade Federal de Pernambuco. Disponível em: < <http://www.capes.gov.br> >. Acesso em: 21set.2002.

FIGUEIREDO, L.H.A. **Propriedades físicas e mecânicas de um Latossolo Roxo submetido a diferentes sistemas de manejo**. 1998. 68f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Viçosa, 1998.

FIGUEIREDO, L.H.A.; DIAS JÚNIOR, M. S.; FERREIRA, M.M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.24, n.1, p.487-493,2000.

FOLONI, J.S.S. **Crescimento radicular da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) e de cinco adubos verdes em função da compactação do solo**. 1999. 73f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu,1999.

GOEDERT, W.J.; SCHERMACK, M. J.; FREITAS, F.C. Estado de compactação do solo em áreas cultivadas no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.2, p.223-227, fev. 2002.

GONÇALVES, J.R.P. **Efeitos de três espécies de adubos verdes cultivados no inverno sobre as propriedades físicas do solo, desenvolvimento da planta e produção de milho (*Zea mays* L.) sob cultivo convencional e plantio direto**. 1999. 90f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1999.

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, n.1, p.421-431, dez. 1966.

GUIMARÃES, C.M.; MOREIRA, J.A.A. Compactação do solo na cultura do arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.4, p.703-707, abr. 2001.

GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to assess the susceptibility of soil to excessive compaction. **Soil Science**, Baltimore, v.6, n.1, p.65-100, 1987.

HALLMARK, W.B.; BARBER, S.A. Root growth and morphology, nutrient uptake, and nutrient status of soybean as affect by soil K and bulk density. **Agronomy Journal**, Madison, v.73, p.779-782, 1981.

HATANO, R. et al. Relathionship between the distribution of soil macropores and root elongation. **Soil Science Plant Nutrition**, Tokyo, v.34, n.4, p.535-546, 1988.

HOFFMAN, C.; JUNGK, A. Growth and phosphorus supply of sugar beet as affect by soil compaction and water tension. **Plant and soil**, Dordrecht, v.176, p.15-25, 1995.

HORTON, R.; ANKENY, M.D.; ALLMARAS, R.R. Effects of compaction on soil hydraulic properties. In: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C.VAN. (Ed.). **Soil Compaction in Crop Production**. Amsterdam: Elsevier Science, 1994. 662 p.

KHALILIAN, A. et al. Soil compaction and crop response to wheat/soybean interseeding. **American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v.34, n.6, p.2299-2303, 1991.

KIEHL,E.J. **Manual de Edafologia**: relações solo-planta. São Paulo: CERES, 1979. 262p.

KIRKEGAARD, J.A.; SO, H.B.; TROEDSON, R.J. Effect of compaction on the growth of pigeon pea on clays soils.III.Effect of soil type and water regime on plant response. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.26, p.163-178, 1993.

KLEIN, V.A. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. 1999. 150f. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um Latossolo Roxo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, n.6, p.959-964, 2000.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L.; SILVA, A.P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.18, n.2, p.45-54, dez. 1998.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.19, n.1, p.395-401, 1995.

MANTOVANI, E.C. Compactação do Solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.13, n.147, p. 52-55, mar. 1987.

MARIA, I.C. de; CASTRO, O.M.; SOUZA DIAS, H. Atributos físicos e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.23, n.1, p.703-709, 1999.

MARONEZZI, A.C.; LUCAS, G.L.de. Considerações gerais sobre o cultivo do Pé de Galinha – *Eleusine coracana* L. como fonte de biomassa, descompactação do solo e integração agricultura – pecuária no sistema de plantio direto. In: AGR NORTE PESQUISA E CONSULTORIA. **Cultivo do pé de galinha - *Eleusine coracana* L.** Mato Grosso, 2000. Não paginado. (Boletim Técnico, 2).

MELLO IVO, W.M.P.; MIELNICZUK, J. Influência da estrutura do solo na distribuição e na morfologia do sistema radicular do milho sob três métodos de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.23, n.1, p.135-143, 1999.

MEROTTO JÚNIOR, A.; MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.23, n.1, p.197-202, 1999.

MERTEN, G.H.; MIELNICZUK, J. Distribuição do sistema radicular e dos nutrientes em Latossolo Roxo sob dois sistemas de preparo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, n.1, p.369-374, 1991.

MILHETO, 1997. Disponível em : < <http://www.agromais.com.br> >. Acesso em: 7nov.2002.

MIRANDA, J. et al. Crescimento de leguminosas em cilindros de solo com camadas compactadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 23.,1991, Porto Alegre. **Programas e Resumos...** Campinas: SBCS, 1991.

MORAES, M.H.; BENEZ, S.H. Efeitos de diferentes sistemas de preparo do solo em algumas propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada e na produção de milho para um ano de cultivo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.16, n.2, p.31-41, dez. 1996.

MORAES, M.H.; BENEZ, S.H.; LIBARDI, P.L. Influência de camadas compactadas de subsuperfície no desenvolvimento do sistema radicular de plantas de soja (*Glycine Max.* (L) Merrill). **Científica**, São Paulo, v.9, n.1, p.195-206, 1991.

MORAES, M.H.; BENEZ, S.H.; LIBARDI, P.L. Efeitos da compactação em algumas propriedades físicas do solo e seu reflexo no desenvolvimento das raízes de plantas de soja. **Bragantia**, Campinas, v.54, n.2, p.393-403, 1995.

MÜLLER, M.M.L. et al. Crescimento de raízes e acúmulo de nutrientes em espécies de inverno em função da presença de camada de solo compactado em subsuperfície. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 27., 1999, Brasília. **Programas e Resumos...** Viçosa: SBSC, 1999.

NOGUEIRA, S.dos S.S.; MANFREDINI, S. Influência da compactação do solo no desenvolvimento da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.18, n.9, p.973-976, set. 1983.

NOVAK, L.R. et al. Efeito do tráfego de trator e da pressão de contato pneu/solo na compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro Álico, em dois níveis de umidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.27, n.12, p.1587-1595, dez. 1992.

NUERNBERG, N.J.; STAMMEL, J.G.; CABEDA, M.S.V. Efeito de sucessão de culturas e tipos de adubação em características físicas de um solo da encosta basáltica Sul-Rio-Grandense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.10, n.1, p.185-190, 1986.

ORTOLANI, A.F.; COAN, O.; SALLES, H.C. Influência da compactação do solo no desenvolvimento da soja (*Glycine max* (L.) Merrill). **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v.6, n.1, p.35-42, 1982.

OSTERROHT, M.V. O que é uma adubação verde: princípios e ações. **Agroecologia**, Botucatu, ano 2, n.14, p.9-11, maio/jun. 2002.

PACE, L. et al. Desenvolvimento radicular e acúmulo de nutrientes em adubos verdes de verão submetidos à compactação do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 27., 1999, Brasília. **Programas e Resumos...** Viçosa: SBSC, 1999.

PEDROTTI, A. et al. Sistemas de cultivo de arroz irrigado e a compactação de um Planossolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.4, p.709-715, abr. 2001.

PIZAIA, A. **Desenvolvimento de cinco cultivares de milho (*Zea mays* L.), em solo compactado, submetido a dois sistemas de cultivo.** 1996. 79f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Genética e Melhoramento de Plantas) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1996.

PRADO, R. de M.; ROQUE, C.G.; SOUZA, Z.M. de. Sistemas de preparo e resistência à penetração e densidade de um Latossolo Vermelho Eutrófico em cultivo intensivo e pousio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.12, p.1795-1801, dez. 2002.

QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; NOGUEIRA, S.dos S.S.; MIRANDA, M.A.C.de. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.5, p.929-938, maio 2000.

RAIJ, B.VAN. et al. **Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo – Fundação IAC, 1996. 2 ed. 285p.

RAIJ, B.VAN.; QUAGGIO, J.A. **Métodos de análise do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1983. 31p. (Boletim Técnico, 81).

ROSA JÚNIOR, E.J. **Efeito de sistema de manejo de solo sobre o desenvolvimento do milho safrinha e em alguns parâmetros físicos e químicos de um Latossolo Roxo de Dourados**. 2000. 112f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.

ROSOLEM, C.A.; ALMEIDA, A.C.da S.; SACRAMENTO, L.V.S.do. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v.53, n.2, p.259-266, 1994a.

ROSOLEM, C.A. et al. Preparo do solo e sistema radicular do trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, n.1, p.115-120, 1992.

ROSOLEM, C.A. et al. Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.18, n.1, p.491-497, 1994b.

ROSOLEM, C.A. et al. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.5, p.821-828, maio 1999.

SAINI, G.R.; CHOW, M.J. Compactability indexes of some agricultural soils of New Brunswick, Canada. **Soil Science**, Baltimore, v.137, n.1, p.33-38, 1984.

SANTOS, G.A.dos. **Graus de compactação e adubação fosfatada no crescimento e nutrição do milho em solos distintos**. 2001. 80f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Viçosa, 2001.

SANTOS, R.O.dos. **Efeito da compactação sobre algumas propriedades físicas de duas classes de solo e seu reflexo no desenvolvimento inicial da raiz primária de plântulas de milho**. 2000.67f.Tese (Mestrado em Agronomia/Ciências do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco. Disponível em : < <http://www.capes.gov.br> >. Acesso em: 1nov.2002.

SEIXAS, J. **Níveis de compactação do solo na cultura do milho (*Zea mays*)**. 2001.80f.Tese (Mestrado em Ciências do Solo) – Universidade Federal do Paraná. Disponível em: < <http://www.capes.gov.br> >. Acesso em: 21set.2002.

SHIERLAW, J.; ALSTON, A.M. Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. **Plant and soil**, Dordrecht, v.77, p. 15-28, 1984.

SIDIRAS, N.; VIEIRA, S.R.; ROTH, C.H. Determinação de algumas características físicas de um Latossolo Roxo Distrófico sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.8, n.1, p.265-268, 1984.

SILBERBUSH, J.; HALLMARK, W.B.; BARBER, S.A. Simulation of effects of soil bulk density and P addition on K uptake by soybeans. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.14, n.4, p.287-296, 1983.

SILVA, R.H.da. **Crescimento radicular e nutrição mineral da soja (*Glycine Max*) em função da cultura anterior e da compactação em Latossolo Vermelho-Escuro**. 1998. 81f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1998.

SILVA, R.H.da; ROSOLEM, C.A. Influência da cultura anterior e da compactação do solo na absorção de macronutrientes em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.10, p.1269-1275, out. 2001.

SILVA, R.H. da.; ROSOLEM, C.A. Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.6, p.855-860, jun. 2002a.

SILVA, R.P.; CARVALHO FILHO, A.; COAN, O. Efeitos do arado de aivecas e da enxada rotativa na camada mobilizada do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.22, n.1, p.110-117, jan. 2002b.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.24, n.1, p.239-249, 2000.

SIQUEIRA, J.A.C. **Efeitos de sistema de cultivo em diferentes teores de água sobre a compactação do solo**. 1999.135f.Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Disponível em: < <http://www.capes.gov.br> >. Acesso em: 14out.2002.

SOANE, B.D. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.16, p.179-201, 1990.

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M.da. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.1, p.83-91, jan. 1999.

TAYLOR, H.M.; ARKIN, G.F. Root zone modification: fundamentals and alternatives. In: TAYLOR, H.M.; ARKIN, G.F. **Modifying the root environment to reduce crop stress**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, p.1-17, 1981.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, n.1, p.333-339, 1996.

TORMENA, C.A. et al. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.59, n.4, p.795-801, 2002.

TORRES, E.; SARAIVA, O.F.; GALERANI, P.R. **Manejo do solo para a cultura da soja**. Londrina: Centro Nacional de Pesquisa do Solo - Embrapa 1993. 71p. (Circular Técnica, 12).

VESPRASKAS, M.J.; WAGGER, M.G. Corn root distribution and yield response to subsoiling for Paleudults having different aggregate sizes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.54, p.849-854, 1990.

VIEIRA, M.J.; MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.19, n.7, p.873-882, jul. 1984.

WATANABE, S.H. **Caracterização física de um Latossolo Vermelho Distrófico submetido a diferentes métodos de preparo do solo**. 2001.58f.Tese (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Maringá. Disponível em : < <http://www.capes.gov.br> >. Acesso em: 21set.2002.

WHITELEY, G.M.; DEXTER, A.R. Root development and growth of oil seed, wheat and pea crops on tilled and non-tilled soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.2, p.379-393, 1982.

WUTKE, E.B. et al. Propriedades do solo e sistema radicular do feijoeiro irrigado em rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.24, n.1, p.621-633, 2000.