

LIMITES CRÍTICOS DE DENSIDADE DO SOLO PARA O CRESCIMENTO DE RAÍZES DE PLANTAS DE COBERTURA EM ARGISSOLO VERMELHO⁽¹⁾

Dalvan José Reinert⁽²⁾, Jackson Adriano Albuquerque⁽³⁾, José Miguel Reichert⁽²⁾, Celso Aita⁽²⁾ & Martín María Cubilla Andrada⁽⁴⁾

RESUMO

A compactação é um grave problema para a qualidade do solo e o desenvolvimento de uma agricultura sustentável, pois modifica os fluxos de água e ar no solo e reduz a produtividade das culturas agrícolas. Uma das alternativas para amenizar esse problema é o uso de espécies com sistema radicular profundo e vigoroso. O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade física de um Argissolo Vermelho cultivado no sistema de plantio direto, após o cultivo de plantas de cobertura, e identificar o limite crítico de densidade do solo. No outono/inverno de 1999/00 e 2000/01, toda a área experimental foi cultivada com aveia-preta (*Avena strigosa*) mais ervilhaca (*Vicia sativa*) e, em 2001/02, com nabo forrageiro (*Raphanus sativus*). No verão, foi semeado milho (*Zea mays*) e, no final do ciclo, foram semeadas as plantas de cobertura de verão, crotalária juncea (*Crotalaria juncea*), guandu-anão (*Cajanus cajan*), mucuna-cinza (*Stilozobium cinereum*) e feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), e comparadas ao pousio. Foram medidas a densidade e a resistência do solo à penetração. O sistema radicular das plantas foi avaliado pelo método do perfil radicular durante o ciclo do nabo forrageiro, do milho e das plantas de cobertura de verão. O plantio direto nesse Argissolo Vermelho eleva a densidade do solo para níveis considerados limitantes às plantas. Todas as culturas utilizadas nas rotações tiveram restrições de crescimento das raízes, e não foi possível observar diferenças entre as espécies no potencial de crescimento das raízes em solos compactados. O crescimento normal das raízes das plantas de cobertura ocorreu até o limite de densidade de 1,75 Mg m⁻³. Entre a faixa de 1,75 e 1,85 Mg m⁻³, ocorreu restrição, com deformações na morfologia das

⁽¹⁾ Recebido para publicação em junho de 2007 e aprovado em agosto de 2008.

⁽²⁾ Professor, Departamento de Solos, CCR, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Av. Roraima 1000, CEP 97105-900 Santa Maria (RS). Pesquisador do CNPq. E-mail: dalvan@ccr.ufsm.br

⁽³⁾ Professor, Departamento de Solos, Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Caixa Postal 281, CEP 88520-000 Lages (SC). Estagiário de Pós-Doutorado na UFSM. E-mail: albuquerque@pq.cnpq.br

⁽⁴⁾ Doutorando de Agronomia na Kansas University – EUA. E-mail: cubilla@ksu.edu

raízes em grau médio, e, acima de $1,85 \text{ Mg m}^{-3}$, essas deformações foram significativas, com grande engrossamento, desvios no crescimento vertical e concentração na camada mais superficial. Todas as espécies avaliadas podem ser utilizadas em solos com algum grau de compactação, mas, quando a densidade for superior a $1,85 \text{ Mg m}^{-3}$, pode ser necessária a mobilização do solo com escarificador e, ou, subsolador para facilitar a penetração das raízes em profundidade.

Termos de indexação: compactação, plantio direto, leguminosas.

SUMMARY: BULK DENSITY CRITICAL LIMITS FOR NORMAL ROOT GROWTH OF COVER CROPS

Soil compaction is a serious problem for the soil quality and development of sustainable agriculture, because compaction affects the flow of soil water and air and reduces crop yields. One of the possibilities to tackle this problem is the use of plants with a deep and vigorous rooting system. The objective of this study was to evaluate the physical quality of a Typic Hapludalf, in a no-tillage system, after the use of cover crops, and to measure the critical limit of bulk density. In the autumn/winter of 1999/00 and 2000/01 the site was cultivated with black oats (Avena strigosa) with vetch (Vicia sativa) and in 2001/02, with forage turnip (Raphanus sativus). Corn was sown (Zea mays) in the summer, and in the end of the cycle, four summer cover crops were sown (Crotalaria juncea, Cajanus cajan, Stilobolus cinereus and Canavalia ensiformes) and compared to fallow soil. Soil bulk density and penetration resistance were measured. The rooting system was evaluated by a root profile method during the cycle of forage turnip, corn and summer cover crops. No tillage increased soil bulk density to levels considered critical for plant growth. The root growth of all crops used in the rotations suffered some degree of restriction. There were no differences among species in their root growth potential in compacted soil. The cover crop root growth was normal up to a bulk density of 1.75 Mg m^{-3} , while values between 1.75 and 1.85 Mg m^{-3} were restrictive, with visible deformation of the root morphology. Above 1.85 Mg m^{-3} these deformations were more pronounced, with increased root thickening, deviations in the vertical root growth direction and concentration of roots in the topmost soil layer. The evaluated species can be used in compacted soils, but at soil bulk density $> 1.85 \text{ Mg m}^{-3}$ soil mobilization through mechanical methods may be necessary to alleviate the effects on root and plant growth.

Index terms: compaction, no-tillage, leguminous.

INTRODUÇÃO

A densidade do solo em ambientes não cultivados é uma propriedade física que depende dos fatores e processos pedogenéticos. O uso pode compactar o solo, expresso pelo aumento da densidade devido ao pisoteio animal, tráfego de máquinas e implementos agrícolas, cultivo intensivo e sistema de manejo inadequado (Hamza & Anderson, 2005).

No sistema plantio direto, a compactação tem sido constatada na camada superficial (Alves & Suzuky, 2004). Em alguns locais, reduz a produtividade das culturas (Letey, 1985; Ishaq et al., 2001). Efeitos mais pronunciados desse problema são observados quando o solo é cultivado sob sucessão de culturas. Em sistemas com rotação de culturas e uso de plantas de cobertura, pode melhorar a qualidade química (Bayer & Mielniczuk, 1997; Bayer et al., 1998) e física do

solo (Albuquerque et al., 1995; Tormena et al., 2004; Argenton et al., 2005), mas, a curto prazo, isso não foi observado por Genro Junior et al. (2004).

Em grau elevado de compactação, métodos mecânicos como escarificação ou subsolagem são necessários, mas a redução da compactação observada no primeiro ano após a mobilização não foi no segundo ano, conforme relatado por Hall et al. (1994). Após dois anos da escarificação de um Latossolo Vermelho sob plantio direto, Vieira & Klein (2007) não observaram diferenças na densidade do solo, porém a taxa de infiltração de água ainda era maior no plantio direto, que recebeu escarificação.

A semeadura de plantas de cobertura do solo com sistema radicular abundante e vigoroso pode ser uma alternativa aos métodos mecânicos (Abreu et al., 2004; Hamza & Anderson, 2005), com benefícios adicionais por reciclarem nutrientes no perfil, aportarem matéria

orgânica (Fageria et al., 2005) e melhorarem a estabilidade dos agregados, conferindo ao solo maior porosidade e resistência mecânica (Camargo & Alleoni, 1997; Bronick & Lal, 2005; Villamil et al., 2006).

Estudos com maior duração indicam melhorias no solo com rotação de culturas e introdução de plantas de cobertura. Após sete anos de uso de rotação de culturas, Albuquerque et al. (1995) observaram redução em $0,07 \text{ Mg m}^{-3}$ da densidade na camada de 0,01 a 0,086 m em um Latossolo Vermelho-Escuro. Em Latossolo Vermelho cultivado por cinco anos com plantas de cobertura, Argenton et al. (2005) relataram que a mucuna-cinza no preparo reduzido melhorou a qualidade física, observada pelo aumento da macroporosidade, porosidade total e condutividade hidráulica.

É comum relacionar o crescimento radicular em solos compactados com sua densidade. Para cada solo há uma densidade crítica, a partir da qual a resistência torna-se tão elevada que diminui ou impede o crescimento de raízes (Rosemberg, 1964; Cintra & Mielniczuk, 1983; Pedó, 1986). A densidade do solo crítica é dependente principalmente de sua classe textural. Argenton et al. (2005) constataram que, em Latossolo Vermelho argiloso, a deficiência de aeração inicia-se com densidade do solo próxima de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$, e Klein (2006), para mesma classe de solo, baseado no intervalo hídrico ótimo, observou que a densidade limitante foi de $1,33 \text{ Mg m}^{-3}$. Reichert et al. (2003) propuseram densidade do solo crítica para algumas classes texturais: $1,30$ a $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos argilosos, $1,40$ a $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$ para os franco-argilosos e de $1,70$ a $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$ para os franco-arenosos.

A habilidade das raízes penetrarem no perfil diminui quando a densidade e a resistência do solo aumentam. Em solos com menor umidade, a coesão e a resistência do solo à penetração aumentam e a pressão hidrostática das células das raízes diminui, com conseqüente redução da força na coifa e na região meristemática para superar a resistência do solo (Hamza & Anderson, 2005). De maneira geral, considera-se de $2,0$ a $2,5 \text{ MPa}$ a faixa crítica de resistência do solo com redução importante no crescimento radicular (Taylor et al., 1966; Taylor, 1971).

Algumas espécies podem, mesmo em solos compactados, desenvolver o sistema radicular em função das especificidades de cada espécie (Rosolem et al., 2002). Essas diferenças auxiliam na seleção de espécies capazes de crescer em condições adversas e ser utilizadas na recuperação de solos. Após a morte e decomposição das raízes, o solo fica com uma quantidade maior de bioporos, nos quais ocorrem as trocas gasosas, o fluxo descendente de água (Abreu et al., 2004) e o crescimento das raízes das plantas subseqüentes (Williams & Weil, 2004). Para avaliar a capacidade de crescimento das espécies em condições adversas, é necessário avaliar esse crescimento em solos com diferentes texturas e densidades.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade física de um Argissolo Vermelho cultivado no sistema de plantio direto, após o cultivo de plantas de cobertura, e identificar no campo qual é o limite crítico de densidade para essas plantas.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria-RS, situada na região fisiográfica da Depressão Central. A localização geográfica da área é $29^{\circ} 45' \text{ S}$ e $53^{\circ} 42' \text{ W}$ e altitude de 96 m . O solo é um Argissolo Vermelho distrófico típico (Embrapa, 2006), com textura superficial média e subsuperficial argilosa. No local avaliado, o horizonte A tem distribuição das frações argila, silte e areia, de 150 , 120 e 730 g kg^{-1} , respectivamente, e argilomineral predominante a caulinita. O clima da região é caracterizado como Cfa (subtropical úmido sem estiagens), conforme classificação de Köppen, sendo a temperatura média do mês mais quente superior a 22° C e a do mês mais frio entre -3 e 18° C (Moreno, 1961).

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com parcelas subdivididas, com plantas de cobertura na parcela principal e a camada amostrada na subparcela, com três repetições. As parcelas tinham dimensões de $5 \times 5 \text{ m}$. Antes da instalação do experimento, a área foi cultivada no sistema plantio direto desde 1986. A área foi escolhida, pois apresentava sinais de degradação. Em 1999, foram estabelecidas as plantas de cobertura do solo. No outono/inverno de 1999/00 e 2000/01, toda a área experimental foi cultivada com aveia-preta (*Avena strigosa*) mais ervilhaca (*Vicia sativa*) e, em 2001/2002, com nabo forrageiro (*Raphanus sativus*). Após a rolagem das espécies com rolo-faca, foi semeado milho (cultivar Pionner 3063) em final de setembro/início de outubro (Quadro 1) no espaçamento de $0,9 \text{ m}$ entre linhas, com semeadora de plantio direto. De maio a janeiro, toda a área era cultivada com as mesmas espécies, e, de final de janeiro a maio, era deixada em pousio ou cultivada com plantas de cobertura de verão, todas leguminosas, constituindo os tratamentos: pousio, sem planta de cobertura; crotalaria juncea (*Crotalaria juncea*); guandu-anão (*Cajanus cajan*); feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*); e mucuna-cinza (*Stilozobium cinereum*), semeadas manualmente com quantidades de sementes de, respectivamente, 40 , 40 , 120 e 100 kg ha^{-1} , todas com espaçamento de $0,45 \text{ m}$ entre linhas. No pleno florescimento das plantas de cobertura, foi determinada a produção de matéria seca em área quadrada com $0,7 \text{ m}$ de lado. A colheita do milho foi manual, e a produtividade, expressa com umidade dos grãos de 13% .

O sistema radicular do nabo forrageiro, do milho e das leguminosas de verão foi avaliado pelo método do

Quadro 1. Sistema de rotação e épocas de implantação das culturas. Período de 1999/02

Período	1999/00	2000/01	2001/02
Maio/setembro-outubro	Aveia mais ervilhaca ⁽¹⁾	Aveia mais ervilhaca	Nabo forrageiro
Setembro-outubro/fevereiro-março	Milho	Milho	Milho
Fevereiro/maio	Leguminosas de verão	Leguminosas de verão	Leguminosas de verão

⁽¹⁾ 30 % de sementes de aveia mais 70 % de sementes de ervilhaca.

perfil radicular descrito por Böhm (1979), em cada parcela nos três blocos, totalizando para cada tratamento: seis plantas de nabo forrageiro em 30 de agosto de 2001, quando a cultura estava em pleno florescimento; três plantas de milho no dia 15 de dezembro de 2001, quando 75 % das plantas estavam florescidas; e três plantas de cobertura de verão em 7 de maio de 2002. O perfil foi perpendicular à linha de semeadura das plantas e as raízes foram expostas com haste pontiaguda. Após, foi disposto um retângulo com dimensões de 0,5 m de largura por 0,3 m de altura para as plantas de cobertura e de 0,9 m de largura por 0,4 m de altura para o milho. Esses retângulos estavam subdivididos em quadriculados com 0,05 m de lado, para fotografar a distribuição das raízes das plantas.

Com as observações de campo e as fotografias, foi possível identificar três padrões de crescimento radicular, classificados em função do grau de restrição baixo, médio e alto. Esses padrões de crescimento foram relacionados com as respectivas densidades do solo.

A densidade do solo foi determinada em 30 de agosto de 2001, com a coleta de amostras com estrutura preservada, com um cilindro extrator de 0,5 m de comprimento e 0,05 m de diâmetro forçado verticalmente no solo, onde a estratificação foi feita diretamente no monolito extraído a cada 0,05 m. A densidade do solo foi determinada dividindo-se a massa de solo seco a 105 °C pelo volume da amostra.

A resistência do solo à penetração foi medida com um penetrômetro eletrônico com ponta cônica de 30°, marca RIMIK modelo CP 20, inserido manualmente no solo em três pontos por parcela, obtendo-se leituras de resistência a cada incremento de 0,015 m de profundidade. A resistência do solo à penetração foi determinada em 17 de setembro de 2001, durante o crescimento do nabo; em 15 de dezembro de 2001, durante o crescimento do milho; em 7 de maio de 2002, durante o crescimento das plantas de cobertura. A umidade do solo variou entre as camadas de 0,11 a 0,12 kg kg⁻¹ no nabo e de 0,09 a 0,10 kg kg⁻¹ no milho. Durante o cultivo do milho, em períodos de déficit hídrico, havia suplementação de água por irrigação.

A análise estatística da densidade e resistência do solo à penetração foi feita com base na análise de

variância pelo teste F para cada camada; quando o efeito foi significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Fischer, com base na diferença mínima significativa (5 %) (SAS, 2002).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Densidade do solo e resistência do solo à penetração

A média de todas as avaliações das plantas de cobertura e camadas foi de 1,75 Mg m⁻³, e, considerando todas as determinações (n = 90), variou de 1,36 a 1,92 Mg m⁻³. A média e a mediana diferem pouco em cada planta de cobertura, e a maior diferença entre ambas foi observada para a crotalária (Quadro 2). Nesta cultura, foram observadas também maiores amplitude, desvio-padrão, variância e coeficiente de variação. Apesar de a média ter diferido pouco entre os tratamentos, a menor média e o maior desvio-padrão para a crotalária podem indicar que o solo cultivado com esta cultura, em alguns locais, tem menor densidade (1,36 Mg m⁻³; Quadro 2). Esse valor foi observado na camada de 0 a 0,05 m, o que resultou na menor densidade média entre as culturas avaliadas. Na camada de 0,05 a 0,10 m, a menor densidade foi observada com guandu (1,64 Mg m⁻³). Se essas observações se repetirem ao longo dos anos, com densidade do solo baixa em alguns pontos, as culturas de cobertura podem melhorar a qualidade física do solo.

A menor densidade do solo, na média das culturas, foi na camada de 0 a 0,05 m (1,58 Mg m⁻³), e as maiores densidades (na faixa de 1,78 a 1,81 Mg m⁻³) ocorreram nas camadas de 0,05 a 0,30 m (Figura 1). Menor densidade na camada superficial também foi observada por Genro Junior et al. (2004) em Latossolo Vermelho distroférrico típico muito argiloso. As menores densidades observadas na camada mais superficial podem estar relacionadas à maior densidade de raízes das culturas utilizadas, conforme visualizado em todas as fotografias, e ao maior teor de matéria orgânica. Além disso, deve ser considerado o efeito dos ciclos de umedecimento e secamento, que resultam do processo mais intenso de evaporação devido à demanda atmosférica e também da maior absorção

Quadro 2. Resumo da análise estatística da densidade do solo nos sistemas com plantas de cobertura no Argissolo Vermelho distrófico típico (N = 18)

	Crotalária	Feijão	Guandu	Mucuna	Pousio
	Mg m ⁻³				
Média	1,725	1,758	1,770	1,749	1,761
Mediana	1,784	1,785	1,800	1,791	1,781
Mínimo	1,357	1,555	1,545	1,438	1,530
Máximo	1,877	1,881	1,890	1,889	1,922
Amplitude	0,520	0,326	0,345	0,451	0,392
Desvio-padrão	0,151	0,081	0,098	0,117	0,115
Variância	0,023	0,007	0,010	0,014	0,013
CV (%)	8,8	4,6	5,5	6,7	6,5

de água pelas raízes das plantas. Além desses efeitos, a semeadura das espécies que é feita três vezes ao ano mobiliza a camada mais superficial do solo, com espaçamento entre os mecanismos sulcadores variável para cada espécie.

A densidade média do solo pode ser considerada elevada, já que solos arenosos podem limitar o sistema radicular das plantas com densidade acima de 1,75 Mg m⁻³, segundo Reichert et al. (2003). Das 90 amostras de solo, 35 % tiveram densidade menor que 1,75 Mg m⁻³; 50 %, entre 1,75 e 1,85 Mg m⁻³; e 15 %, acima de 1,85 Mg m⁻³ (Figura 2). A elevada densidade observada na área e a ampla variação foram adequadas para avaliar a capacidade do sistema radicular das espécies utilizadas crescer em solo compactado. Na mesma classe de solo, Albuquerque & Reinert (2001) observaram variação de 1,41 a

1,71 Mg m⁻³ no horizonte A. As maiores densidades não reduziram o crescimento radicular do milho, e Silva et al. (2005) observaram variação de 1,35 a 1,65 Mg m⁻³, com maior densidade no plantio direto em relação ao campo nativo. Ambos os estudos conduzidos em Argissolo Vermelho relataram menores densidades do que a observada neste estudo.

Nos perfis em que houve dificuldade de crescimento radicular, as raízes se concentraram ainda mais na camada superficial. Esse maior crescimento estimula a formação de poros pela intensificação dos ciclos de umedecimento e secamento, liberação de exsudatos radiculares, formação de agregados pela ação direta das raízes e sua posterior decomposição após a morte das plantas. Na camada com maior quantidade de resíduos, a fauna é importante agente na formação de poros no solo (Lima et al., 2005a).

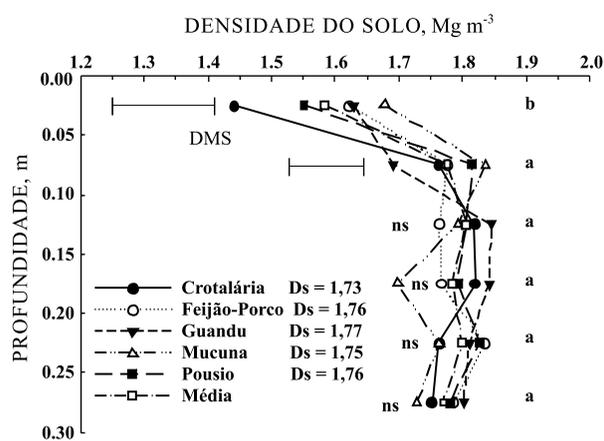


Figura 1. Densidade do solo nas camadas avaliadas em cada sistema de plantas de cobertura e na média das plantas, determinada no momento da avaliação do sistema radicular do nabo forrageiro, em 30 de agosto de 2001. Letras comparam a densidade média de cada camada pelo teste de Fischer (DMS a 5 %).

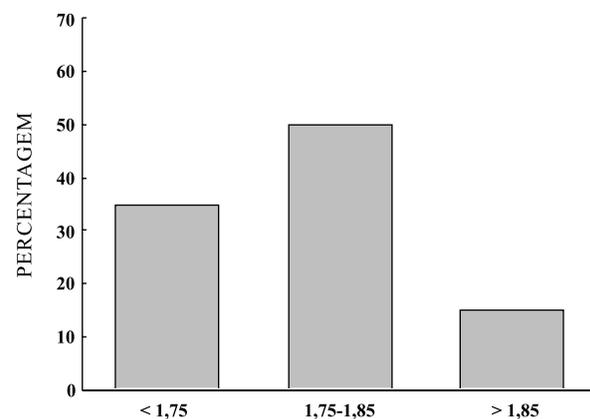


Figura 2. Distribuição percentual do número de amostras (90) com densidade do solo inferior a 1,75 Mg m⁻³, entre 1,75 e 1,85 Mg m⁻³ e superior a 1,85 Mg m⁻³, determinada no momento da avaliação do sistema radicular do nabo forrageiro, em 30 de agosto de 2001.

Uma hipótese do estudo era que haveria redução da densidade do solo pelo uso de plantas de cobertura, o que foi constatado apenas na camada mais superficial. No entanto, é importante considerar que, durante a maior parte do ano, toda a área era cultivada com milho e nabo forrageiro, plantas que também atuam na formação e estabilização de agregados e de poros no solo. Além disso, a avaliação da densidade foi realizada após dois cultivos com plantas de cobertura (30/08/2001), período que pode ser considerado curto para recuperar a qualidade física deste Argissolo franco-arenoso e também para outros solos argilosos, como observado por Genro Junior et al. (2004) em um Latossolo Vermelho.

É importante considerar que o benefício da inclusão das plantas de cobertura está ligado, principalmente, à criação de poros biológicos de alta funcionalidade, conforme constatado por Abreu et al. (2004), quando mediu a infiltração de água no solo em sistema com crotalária em cultivo mínimo. Esses poros, normalmente, representam menos de 3 % do volume do solo, e sua formação reduz pouco a densidade do solo, mas com efeito importante nos fluxos de ar e água no perfil, muitas vezes não detectados por métodos tradicionais. Segundo Braida et al. (2006), alta quantidade de resíduos sobre a superfície do solo reduz os efeitos negativos do tráfego de máquinas, por absorverem parte das pressões exercidas na superfície.

Em Latossolo Vermelho distrófico com teores de argila, silte e areia, respectivamente, de 310, 10 e 680 g kg⁻¹, Cavalieri et al. (2006) constataram maior disponibilidade de água entre as tensões de 10 e 1.500 kPa quando a densidade do solo aumentou de 1,35 até 1,65 Mg m⁻³, mas, acima dessa densidade, o teor de água disponível diminuiu. Com base no intervalo hídrico ótimo, constataram que a densidade

crítica variou de 1,62 a 1,68 Mg m⁻³ em função da camada amostrada e do sistema de manejo utilizado. Assim, além do efeito da densidade do solo no crescimento radicular, devem ser avaliadas outras alterações relacionadas à compactação, como a disponibilidade de água para as culturas.

A menor resistência do solo à penetração foi detectada na camada mais superficial, provavelmente relacionada com a menor densidade do solo (Figura 3). A umidade do solo variou entre as camadas de 0,11 e 0,12 kg kg⁻¹, no cultivo do nabo, e de 0,09 a 0,10 kg kg⁻¹ no cultivo do milho. Assim, pode-se afirmar que a umidade não influenciou a resistência do solo à penetração entre as camadas. Durante o crescimento do milho, a resistência do solo à penetração estava abaixo ou ligeiramente acima de 2.000 kPa, limite considerado crítico ao crescimento radicular. Na camada de 0,25 a 0,40 m, a resistência do solo à penetração foi menor nos tratamentos de pousio e mucuna, e maior no de feijão-de-porco e crotalária juncea. No final do ciclo das plantas de cobertura, a resistência do solo à penetração foi inferior a 1.800 kPa. Em quase todas as camadas, foi menor no pousio e, de 0,25 a 0,35 m, também no com mucuna, mas foi mais elevada no sistema com feijão-de-porco e crotalária (Figura 3).

Os sistemas de culturas modificaram pouco a densidade e a resistência do solo à penetração, embora nas avaliações realizadas durante os cultivos com milho e com plantas de cobertura a menor resistência do solo à penetração tenha sido observada nos sistemas de pousio e mucuna, e a maior, no de feijão-de-porco e crotalária. A maior resistência do solo à penetração nos sistemas com plantas de cobertura em relação ao pousio pode estar relacionada ao crescimento das raízes nos poros, aumentando a resistência e a rigidez do solo, enquanto no pousio os poros vazios não ofereceram

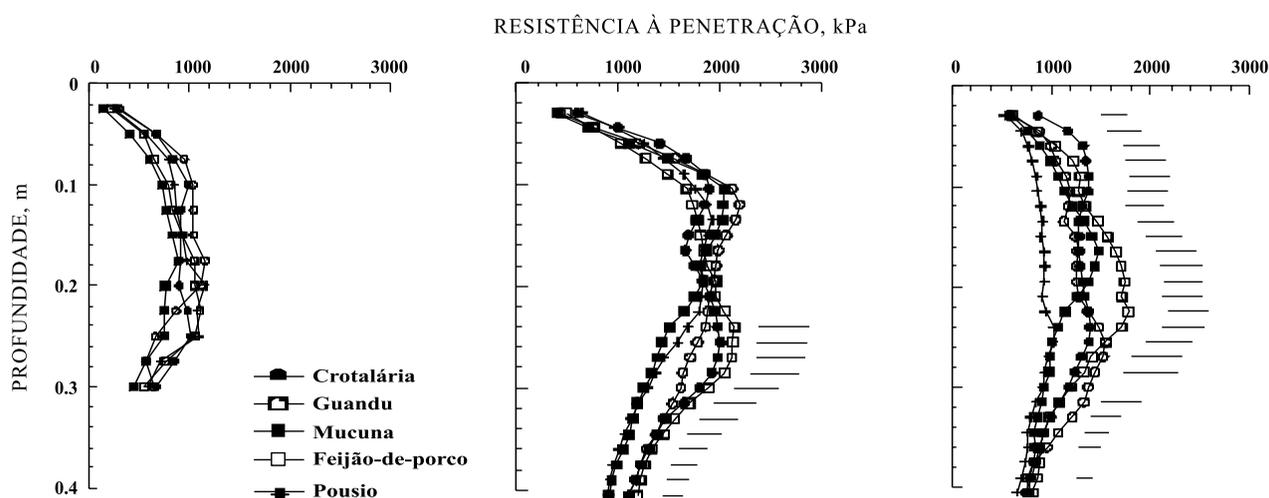


Figura 3. Resistência à penetração (RP) do solo nos tratamentos com plantas de cobertura determinada nos períodos de crescimento do nabo forrageiro (setembro de 2001), milho (dezembro de 2001) e plantas de cobertura de verão (maio de 2002). N = 9 leituras. Barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (DMS a 5 %) para cada profundidade.

resistência à haste do penetrômetro. No sistema com mucuna, foi observado crescimento mais superficial das raízes e menor densidade radicular nas camadas mais profundas. Assim, os poros do solo nessa camada estariam com menos efeito da resistência oferecida pelas raízes – efeito semelhante ao do pousio.

Nos estudos de Imhoff et al. (2000), numa Terra Roxa Estruturada, e de Genro Junior et al. (2004), num Latossolo Vermelho, foi observada relação entre menor umidade e maior resistência do solo à penetração, sendo mais estreita a relação na faixa de menor umidade. Esses últimos não observaram efeito das plantas de cobertura de verão na redução da resistência à penetração, mas enfatizaram que o tempo de atuação das plantas de cobertura foi curto (dois anos).

Nos tratamentos com guandu-anão, crotalária e feijão-de-porco, o sistema radicular pivotante foi mais ramificado e profundo. Com o crescimento em diâmetro das raízes, o solo próximo às raízes sofre pressões elevadas e se compacta, o que pode oferecer maior resistência do solo à penetração. Além disso, Costa et al. (2003) observaram maior resistência à penetração no plantio direto apesar deste ter mesma densidade do solo e maior umidade do que no preparo convencional. Atribuem isso à maior coesão e estabilidade de agregados no plantio direto, o que pode ocorrer também nos diferentes tratamentos com plantas de cobertura, embora a estabilidade não fosse determinada neste estudo. Pela determinação da pressão de pré-consolidação, Carpenedo (1994) também observou que a maior resistência de dois Argissolos e um Latossolo estava relacionada com a resistência dos agregados e a coesão entre estes. A relação entre resistência dos agregados e coesão do solo foi relatada por Lima et al. (2005b), ao estudarem dois Argissolos do Ceará.

Crescimento radicular das espécies

O crescimento das raízes de nabo teve maior restrição nos sistemas com pousio seguido do feijão-de-porco, e menor restrição no sistema com mucuna, apesar de essa cultura ter concentrado o crescimento radicular na camada mais superficial do solo. Na análise conjunta do padrão de crescimento das raízes e da densidade do solo, observa-se que, quando a densidade do solo é inferior a $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$, a raiz do nabo praticamente não apresenta desvios de crescimento, ramificações excessivas nem engrossamento (Figura 4). As raízes primárias atingiram, na maioria, a profundidade de 0,25 m ou mais, e observou-se maior presença de raízes secundárias. Em contrapartida, com densidade variando de $1,85$ a $1,92 \text{ Mg m}^{-3}$, alterações morfológicas foram observadas com frequência. Ocorreu desvio da raiz principal com crescimento no sentido horizontal, e o crescimento em profundidade foi limitado (Figura 4). O crescimento deve ocorrer em zonas do solo que oferecem menor resistência à penetração, compensando em parte o volume de solo explorado pelo sistema

radicular, embora haja concentração radicular nas camadas mais superficiais, o que é mais prejudicial em anos com déficit hídrico. Comportamento semelhante foi observado por Alvarenga et al. (1995) para o sistema radicular do caupi, crotalária juncea e crotalária paulina em Podzólico Vermelho-Amarelo.

A cultura do milho irrigada teve pequenas alterações no crescimento das raízes. Entretanto, nas parcelas com densidade acima de $1,85$ a $1,92 \text{ Mg m}^{-3}$, áreas significativas do perfil não tinham raízes (Figura 5), que assim exploraram menor volume de solo. Foloni et al. (2003) observaram que o impedimento físico em subsuperfície altera a distribuição do sistema radicular do milho no solo, porém não diminuiu a produção total de raízes. Com plântulas de milho semeadas em vasos, Rosolem et al. (1999) observaram que o aumento do teor de argila e, ou, o aumento da densidade reduzem o número de raízes seminais adventícias. Em Latossolo Vermelho de textura média, Freddi et al. (2007) observaram que, quando a resistência à penetração variou entre $1,0$ e $5,7 \text{ MPa}$, houve alterações na morfologia do sistema radicular e redução na produtividade do milho, mas a compactação não impediu o enraizamento.

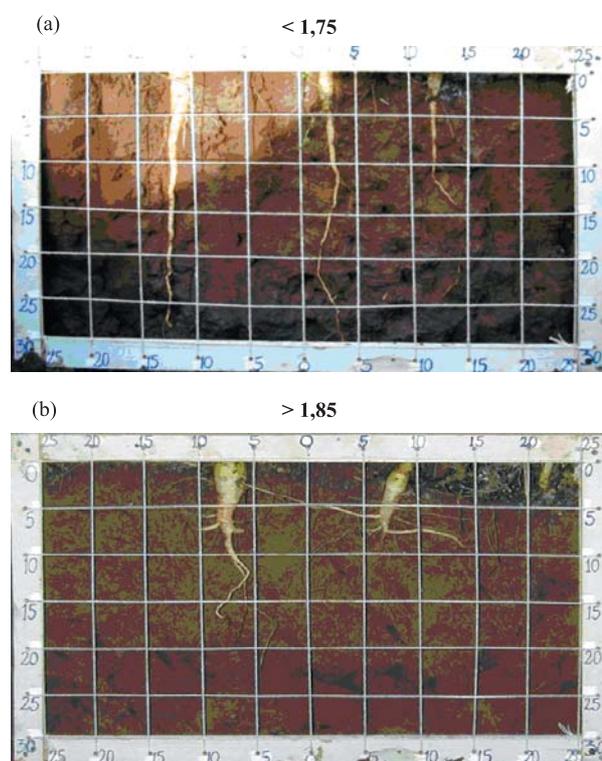


Figura 4. Distribuição radicular do nabo forrageiro, em parcela com densidade do solo igual ou menor que $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$ (a) e igual ou superior a $1,85 \text{ Mg m}^{-3}$ (b). Dimensão da quadrícula: $0,05 \times 0,05 \text{ m}$.

As plantas de cobertura de verão nos perfis sem restrição ao crescimento das raízes tinham extenso e vigoroso sistema radicular. Entretanto, assim como o nabo e o milho, quando a densidade do solo era elevada, o crescimento era menor e com deformações morfológicas (Figura 6). Para a crotalária, nas parcelas com densidade do solo abaixo de $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$, observou-se boa distribuição radicular do perfil; raiz pivotante sem desvios, com mais de 0,3 m de profundidade; e raízes secundárias até 0,20 m de profundidade (Figura 6). A densidade crítica ao crescimento das plantas de cobertura foi de $1,85 \text{ Mg m}^{-3}$. A raiz pivotante da crotalária apresentou desvio no

sentido horizontal, com tortuosidades, e crescimento interrompido na profundidade de 0,20 m. Houve menor distribuição das raízes ao longo do perfil, e as raízes secundárias, em sua maioria, limitaram-se a 0,05 m de profundidade. As raízes de plantas do gênero *Crotalaria* apresentam pequena capacidade de penetrar camadas compactadas, em razão de as plantas jovens desse gênero apresentarem raízes mais grossas, o que dificultaria a penetração em solos compactados (Alvarenga et al., 1995).

Para o solo com densidade menor que $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$, o guandu apresentou sistema radicular bem distribuído ao longo do perfil e com a raiz pivotante atingindo profundidade superior a 0,30 m. Essa capacidade de o sistema radicular do guandu crescer até grandes profundidades também foi reportada por Alvarenga et al. (1995). Em caso de restrição pela elevada densidade, o guandu-anão teve comportamento semelhante ao da crotalária, com redução na distribuição de raízes no perfil e menor presença de raízes secundárias. A raiz pivotante sofreu desvio no sentido horizontal aos 0,07 m de profundidade e, ao encontrar menor resistência à penetração, cresceu até os 0,30 m de profundidade, apesar da restrição oferecida pelo solo. Genro Junior (2002), trabalhando com diferentes esquemas de rotação de culturas, observou maior condutividade hidráulica saturada nos tratamentos que incluíam o guandu-anão na rotação. Atribuiu isso ao aumento de poros grandes e contínuos formados pela decomposição das raízes do guandu.

Quanto à mucuna, não foram observadas diferenças nítidas entre os níveis de densidade do solo. O sistema radicular estava concentrado na camada de 0 a 0,15 m, com ramificação da raiz principal e crescimento em profundidade de parte das raízes secundárias. Para o feijão-de-porco, o crescimento foi vigoroso e profundo. Quando sob restrição, a raiz pivotante se ramificou aos 0,05 m, mas as raízes mais finas alcançaram camadas profundas. Assim, para essa cultura não foi observada restrição severa. É importante destacar que, no caso do feijão-de-porco, a densidade do solo foi superior a $1,85 \text{ Mg m}^{-3}$ apenas na camada de 0,20 a 0,25 m em um bloco, o que impede avaliar se as raízes cresceriam em camada compactada situada próxima da superfície.

Com base na observação dos perfis radiculares das plantas de cobertura e nos dados de densidade do solo, foram sugeridos três graus de densidade do solo: baixo, inferior a $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$; médio, entre 1,75 e $1,85 \text{ Mg m}^{-3}$; e alto, superior a $1,85 \text{ Mg m}^{-3}$. No grau baixo, as raízes não tinham alterações na morfologia. No grau médio, o sistema radicular teve engrossamento, desvios e ramificações de grau moderado, mas o crescimento em profundidade foi pouco afetado. Já para o grau alto, considerado crítico para o crescimento das plantas de cobertura, o sistema radicular teve dificuldade de crescer, com modificações na morfologia das raízes, como grande engrossamento, desvios em ângulos de até 90° e, em casos mais severos, a raiz pivotante foi impedida de crescer.

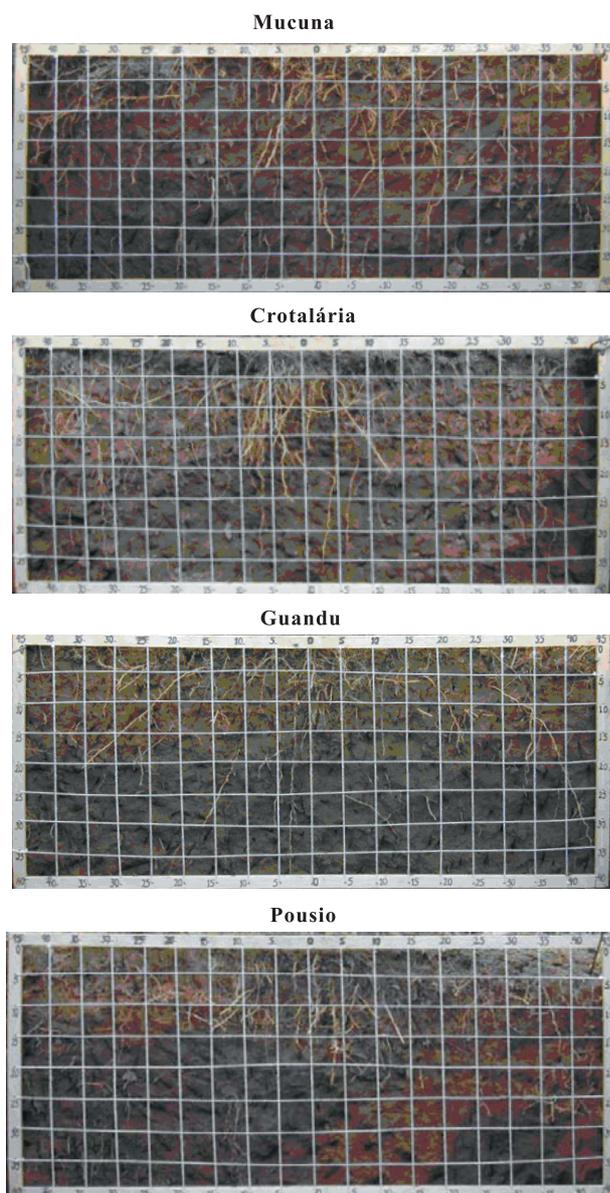


Figura 5. Distribuição radicular da cultura do milho em parcelas com as sucessões mucuna-cinza/nabo; crotalária juncea/nabo; guandu/nabo; e pousio/nabo. Dimensão da quadrícula: 0,05 x 0,05 m.

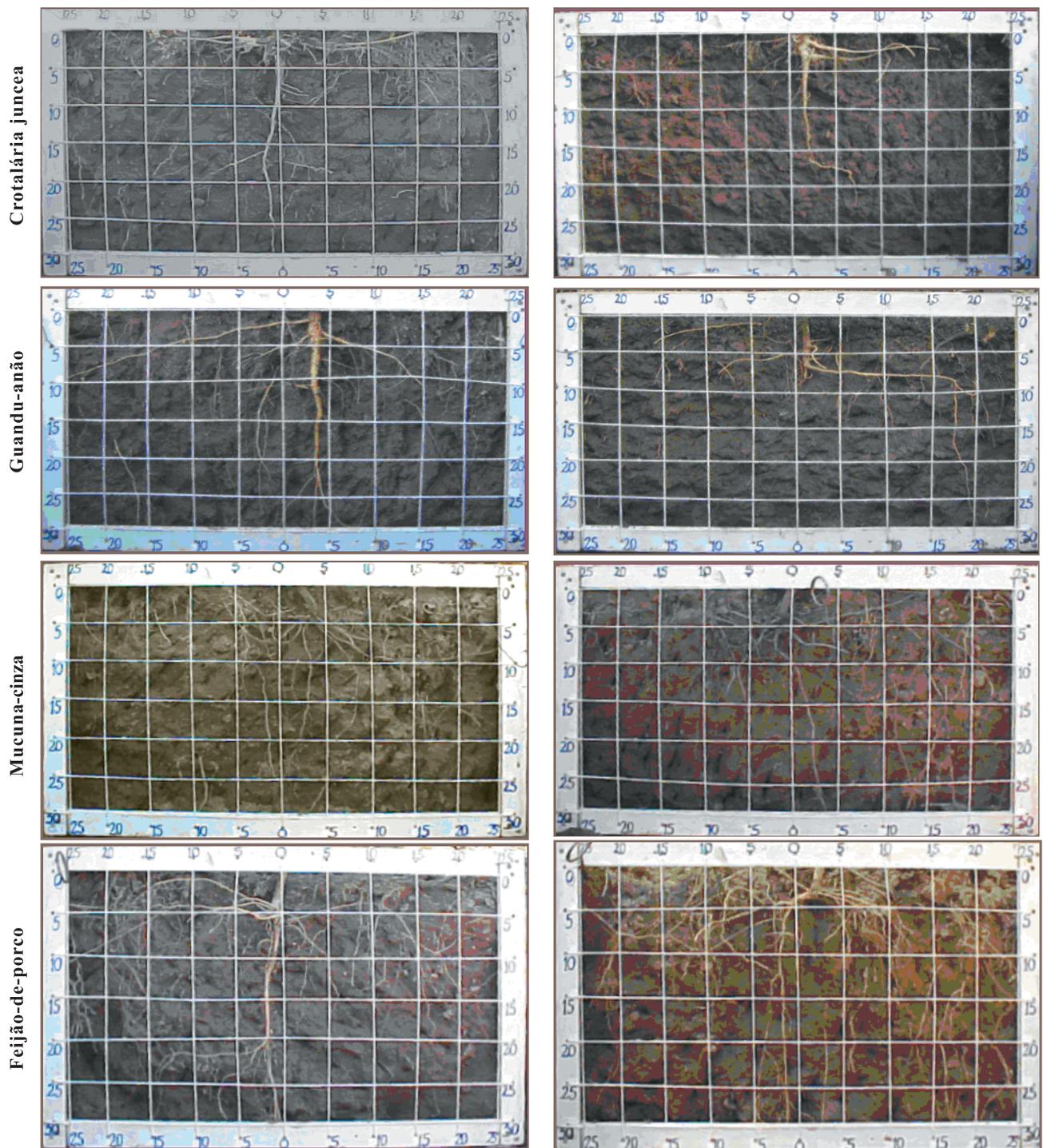


Figura 6. Distribuição radicular das plantas de cobertura crotalária juncea, guandu-anão, mucuna-cinza e feijão-de-porco em parcelas com densidade do solo igual ou menor que $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$ (esquerda) e igual ou maior que $1,85 \text{ Mg m}^{-3}$ (direita). Dimensão da quadricula: $0,05 \times 0,05 \text{ m}$.

Uma consideração importante a ser feita é que, nas plantas de cobertura de verão e no nabo forrageiro, apesar das alterações morfológicas, as raízes cresceram na camada de maior estado de compactação e abaixo dela em mais de 85 % das parcelas. Apesar desse

potencial de crescimento, quando a densidade do solo foi superior a $1,85 \text{ Mg m}^{-3}$, pode ser necessário associar o cultivo de plantas de cobertura com práticas mecânicas, como a escarificação, para amenizar a restrição física em solos compactados.

A produtividade do milho, na safra 2001/2002, variou de 2.950 kg ha⁻¹, no sistema com guandu e pousio, a 4.110 kg ha⁻¹, com mucuna-cinza (Figura 7). A matéria seca do nabo forrageiro variou de 3.580 kg ha⁻¹, no pousio, a 5.340 kg ha⁻¹, na mucuna-cinza. Assim, no tratamento com mucuna-cinza, as produtividades do nabo e do milho refletem em melhorias na qualidade do solo, que devem ser comprovadas em período de tempo mais longo, já que nesses primeiros anos não houve diferença significativa entre os tratamentos, pois o coeficiente de variação foi elevado: 22 % para o milho e 27 % para o nabo. Diferenças nas produtividades podem ser reflexos das melhorias na qualidade física, química e biológica, associados ao grande aporte de matéria orgânica e de nutrientes ao solo, principalmente de N, conforme relatado por Spagnollo et al. (2002) num Latossolo Vermelho, nos sistemas com leguminosas de maior produção de matéria seca. Assim, em áreas degradadas como a deste estudo, a introdução dessas espécies contribui para melhorar a qualidade do solo e aumentar a produtividade das culturas comerciais.

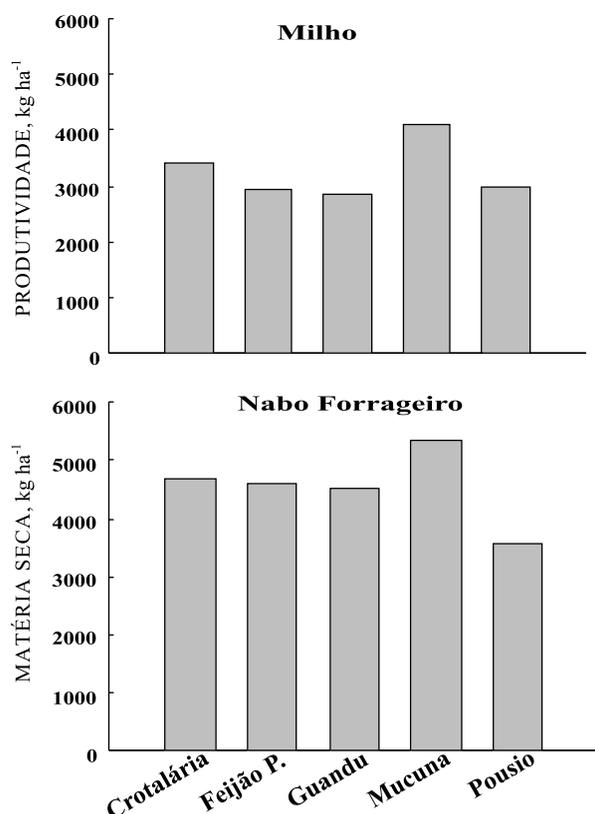


Figura 7. Produtividade de grãos de milho e matéria seca do nabo forrageiro nos tratamentos com plantas de cobertura. N = três repetições. CV para produtividade do milho = 22 % e para a massa seca do nabo = 27 %. Não houve diferença estatística pelo teste de Fischer (DMS a 5 %).

CONCLUSÕES

1. O plantio direto neste Argissolo Vermelho distrófico típico elevou a densidade do solo para níveis limitantes às plantas, observado pela restrição no crescimento do sistema radicular das plantas cultivadas na área.

2. Todas as culturas utilizadas nas rotações tiveram dificuldade de crescimento das raízes e não foi possível observar diferenças no potencial das espécies para crescimento das raízes em solos compactados.

3. O crescimento normal das plantas de cobertura ocorre até o limite de densidade de 1,75 Mg m⁻³. Entre a faixa de 1,75 e 1,85 Mg m⁻³, ocorre restrição com deformações na morfologia das raízes em grau médio e, acima de 1,85 Mg m⁻³, essas deformações são significativas, com grande engrossamento, desvios no crescimento vertical e concentração na camada mais superficial.

4. Todas as espécies avaliadas podem ser utilizadas em solos com compactação excessiva, mas, quando a densidade for superior a 1,85 Mg m⁻³, pode ser necessária a mobilização do solo com escarificador e, ou, subsolador, dependendo da localização da camada compactada.

LITERATURA CITADA

- ABREU, S.L.; REICHERT, J.M. & REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 28:519-531, 2004.
- ALBUQUERQUE, J.A. & REINERT, D.J. Densidade radicular do milho considerando os atributos de um solo com horizonte B textural. R. Bras. Ci. Solo, 25:539-549, 2001.
- ALBUQUERQUE, J.A.; REINERT, D.J.; FIORIN, J.E.; RUEDEL, J.; PETRERE, C. & FONTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: Efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. R. Bras. Ci. Solo, 19:115-119, 1995.
- ALVARENGA, R.C.; COSTA, L.M.; MOURA FILHO, W. & REGAIS, A.J. Características de alguns adubos verdes de interesse para a conservação e recuperação de solos. Pesq. Agropec. Bras., 30:175-185, 1995.
- ALVES, M.C. & SUZUKI, L.E.A.S. Influência de diferentes sistemas de manejo do solo na recuperação de suas propriedades físicas. Acta Sci., 26:27-34, 2004.
- ARGENTON J.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C. & WILDNER, L.P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. R. Bras. Ci. Solo, 29:425-435, 2005.

- BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:105-112, 1997.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. & PAVINATO, A. Sistemas de manejo do solo e seus efeitos sobre o rendimento do milho. *Ci. Rural*, 28:23-28, 1998.
- BÖHM, W. *Methods of studying root systems*. Berlin, Springer-Verlag, 1979. 188p.
- BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M. & REINERT, D.J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:605-614, 2006.
- BRONICK, C.J. & LAL, R. Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 124:3-22, 2005.
- CAMARGO, O.A. & ALLEONI, L.R.F. Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas. Piracicaba, Potafós, 1997. 132p.
- CARPENEDO, V. Compressibilidade de solos em sistemas de manejo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994. 106p. (Tese de Doutorado)
- CAVALIERI, K.M.V.; TORMENA, C.A.; VIDIGAL FILHO, P.S.; GONÇALVES, A.C.A. & COSTA, A.C.S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:137-147, 2006.
- CINTRA, F.L.D. & MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. *R. Bras. Ci. Solo*, 7:197-201, 1983.
- COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V. & WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:527-535, 2003.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.
- FAGERIA, N.K., BALIGAR, V.C. & BAILEY, B.A. Role of cover crops in improving soil and row crop productivity. *Soil Sci. Plant Anal.*, 36:2733-2757, 2005.
- FOLONI, J.S.S.; CALONEGO, J.C. & LIMA, S.L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. *Pesq. Agropec. Bras.*, 38:947-953, 2003.
- FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.M.; ARATANI, R.G. & LEONEL, C.L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:627-636, 2007.
- GENRO JUNIOR, S.A. Alteração da compactação do solo com o uso de rotação de culturas no sistema plantio direto. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2002. 90p. (Tese de Mestrado)
- GENRO JUNIOR, S.A.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:477-484, 2004.
- HALL, D.J.M.; MCKENZIE, D.C.; MACLEOD, D.A. & TOOLT, I.D. Amelioration of a hardsetting Alfisol through deep mouldboard ploughing, gypsum application and double cropping. II. Soil-water relations. *Soil Till. Res.*, 28:271-285, 1994.
- HAMZA, M.A. & ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.*, 82:121-145, 2005.
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & TORMENA, C.A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. *Pesq. Agropec. Bras.*, 35:1493-1450, 2000.
- ISHAQ, M.; HASSAN, A.; SAEED, M.; IBRAHIM, M. & LAL, R. Subsoil compaction effects on crops in Punjab Pakistan. I. Soil physical properties and crop yield. *Soil Till. Res.*, 59:57-65. 2001.
- KLEIN, V.A. Densidade relativa - Um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. *R. Ci. Agron.*, 5:26-32, 2006.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-294, 1985.
- LIMA, H.V.; LIMA C.L.R.; LEÃO, T.P.; COOPER, M.; SILVA, A.P. & ROMERO, R.E. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:677-684, 2005a.
- LIMA, H.V.; SILVA, A.P.; ROMERO, R.E. & JACOMINE, P.G.T. Comportamento físico de um Argissolo Acinzentado coeso no Estado do Ceará. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:33-40, 2005b.
- MORENO, J.A. *Clima do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, Secretaria da Agricultura, 1961. 42p.
- PEDÓ, F. Rendimento e distribuição de raízes de seis espécies de plantas em dois níveis de compactação do solo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1986. (Tese de Mestrado)
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ci. Amb.*, 27:29-48, 2003.
- ROSEMBERG, N.J. Response of plants to the physical effects of soil compaction. *Adv. Agron.*, 16:181-196, 1964.
- ROSOLEM, C.A.; FERNANDEZ, E.M.; ANDREOTTI, M. & CRUSCIOL, C.A.C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. *Pesq. Agropec. Bras.*, 34:821-828, 1999.
- ROSOLEM, C.A.; FOLONI, J.S.S. & TIRITAN, C.S. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. *Soil Till. Res.*, 65:109-115, 2002.
- SAS Institute. *Statistical analysis system. Getting started with the SAS*. Cary, 2002. 86p.

- SILVA, M.A.S.; MAFRA, A.L.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. *Ci. Rural*, 35:544-552, 2005.
- SPAGNOLLO, E.; BAYER, C.; WILDNER, L.P.; ERNANI, P.R.; ALBUQUERQUE, J.A. & PROENÇA, M.M. Leguminosas estivais intercalares como fonte de nitrogênio para o milho, no sul do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:417-423, 2002.
- TAYLOR, H.M. Effect of soil strength on seedling emergence, root growth and crop yield. In: BARNES, K.K., org. *compaction of agricultural soils*. Madison, American Society of Agricultural Engineers, 1971. p. 292-305, 1971. (ASAE Monograph)
- TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M. & PARKER, J.J. Soil strength-root penetration relations for medium-to-coarse-textured soil materials. *Soil Sci.*, 102:18-22, 1966.
- TORMENA, C.A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J.C.; COSTA, A.C.S. & FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:1023-1031, 2004.
- VIEIRA, M.L. & KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:1271-1280, 2007.
- VILLAMIL, M.B.; BOLLERO, G.A.; DARMODY, R.G.; SIMMONS, F.W. & BULLOCK, D.G. No-till corn/soybean systems including winter cover crops: Effects on soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70:1936-1944, 2006.
- WILLIAMS, S.M. & WEIL, R.R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:1403-1409, 2004.