

CRESCIMENTO DE RAÍZES DE LEGUMINOSAS EM CAMADAS DE SOLO COMPACTADAS ARTIFICIALMENTE⁽¹⁾

R. C. ALVARENGA⁽²⁾, L. M. COSTA⁽³⁾, W. MOURA FILHO⁽³⁾
& A. J. REGAZZI⁽³⁾

RESUMO

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação da Universidade Federal de Viçosa em 1992. Testaram-se as leguminosas crotalária júncea (*Crotalaria juncea* L.), guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformes* (L.) DC.), feijão-bravo do ceará (*Canavalia brasiliensis* M. e Benth) e mata-pasto (*Senna occidentalis* L.) quanto à capacidade de suas raízes de penetrar em camadas de um latossolo vermelho-amarelo álico, muito argiloso, com diferentes níveis de compactação. As leguminosas, com exceção do mata-pasto, tiveram os sistemas radiculares significativamente reduzidos dentro da camada compactada e abaixo dela, e apresentaram um acúmulo de raízes no anel superior do vaso, à medida que o nível de compactação aumentou. O mata-pasto sobressaiu como a espécie com maior potencial para crescer em camadas compactadas de solo e o feijão-de-porco foi a leguminosa mais afetada pela compactação.

Termos de indexação: leguminosas, densidade radicular, solos, compactação.

SUMMARY: LEGUMINOUS ROOT GROWTH IN ARTIFICIALLY COMPACTED SOIL LAYER

The experiment was carried out in a greenhouse at the Universidade Federal de Viçosa, State of Minas Gerais, Brazil, in 1992. The leguminous crotalaria (*Crotalaria juncea* L.), pigeon pea (*Cajanus cajan* (L.) Millsp), jack bean (*Canavalia ensiformes* (L.) DC.), feijão-bravo do Ceará (*Canavalia brasiliensis* M. e Benth) and mata-pasto (*Senna occidentalis* L.) were evaluated in terms of root penetration in soil layers (Typic Haplortox) with different levels of artificial compaction. All leguminous root systems, except mata-pasto, were significantly reduced in and below the compacted layer and showed a higher root concentration in the upper part of the pot as compaction increased. Mata-pasto was considered the best species to grow in compacted soil. Jack bean was the leguminous most sensitive to soil compaction.

Index terms: leguminous, root density, lateritic soil, compaction.

- (1) Parte da tese de doutorado apresentada pelo primeiro autor à Universidade Federal de Viçosa e apresentado na 10.^a Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água. Recebido para publicação em novembro de 1994 e aprovado em maio de 1996.
(2) Pesquisador EMBRAPA/Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo, Caixa Postal 151, CEP 35701-970 Sete Lagoas (MG).
(3) Professor Titular da Universidade Federal de Viçosa, CEP 36570-000 Viçosa (MG).

INTRODUÇÃO

A compactação, reconhecida como uma das principais conseqüências do manejo inadequado do solo, é resultante da ação dos implementos de seu preparo, da pressão exercida pelas rodas dos tratores e de máquinas agrícolas e, também, pelo pisoteio de animais (Meredith & Patrick Jr., 1961; Shierlaw & Aston, 1984; Alvarenga et al., 1987). 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. (Meredith & Patrick Jr., 1961; Vepraskas & Miner, 1986; Vepraskas & Waggener, 1990).

Na camada compactada, as raízes sofrem uma série de modificações, tanto de ordem morfológica quanto fisiológica, as quais afetam o seu desempenho e, por conseguinte, o da planta. Grabe (1966) observou que mudanças na morfologia, na hidratação e na taxa de respiração podem ser associadas à habilidade das raízes em penetrar solos compactados. Em solos adensados ou compactados, elas se mostraram curtas e grossas, com elevada massa de matéria seca e com parede celular grossa, sugerindo maior taxa de respiração e maior resistência estrutural, ou seja, menor maleabilidade para se desviarem daqueles pontos de maior resistência no solo. Essas modificações, segundo Wiersum (1958) e Phillips & Kirkham (1962 a, b), dadas as estreitas semelhanças entre seus efeitos, tornam difícil uma avaliação dos fatores que causam impedimentos ou restrições ao crescimento radicular.

O crescimento das raízes em solos compactados, segundo Gill & Bolt (1955), deve-se ao balanço entre a pressão externa, oferecida pelo solo, e a interna, exercida pela raiz, sendo a taxa de crescimento da raiz condicionada, primeiramente, pela menor pressão oferecida pelo solo do que pela maior pressão exercida pelas raízes.

Estas podem crescer nas fendas do solo, principalmente quando as paredes são constituídas por material de alta resistência à penetração ou densidade do solo elevada o suficiente para inibir o crescimento das raízes dentro dos agregados (Vepraskas et al., 1986; Thompson et al., 1987). Estudando o crescimento de raízes de soja em camadas de solo compactadas, Borges et al. (1988) observaram que as raízes se apresentavam tortuosas e que, possivelmente, isso fosse devido ao crescimento delas mediante os pontos de menor resistência oferecidos pelo solo e não à maior pressão que elas possam ter exercido.

A porosidade e a aeração do solo desempenham importante papel no crescimento das raízes. Shierlaw & Alston (1984) verificaram que a compactação do solo diminuiu o número de poros grandes, similares em tamanho e diâmetro às raízes das plantas, e, desse modo, as raízes não puderam penetrar em poros de diâmetros menores que os seus. Assim, raízes finas podem penetrar em solos compactados mais facilmente que as grossas.

Meredith & Patrick Jr. (1961), além de destacarem a importância dos macroporos na penetração de raízes, salientam que esses poros são extremamente sensíveis à compactação do solo, o que foi também observado por Rosenberg & Willits (1962) e Phillips & Kirkham (1962b), e que, com altos níveis de compactação, quase todos os poros não capilares são destruídos.

Trabalhos têm mostrado que, quando a macroporosidade do solo é reduzida a valores inferiores a $0,15 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$, o crescimento das raízes é prejudicado. Essa tendência foi observada por Meredith & Patrick Jr. (1961); Avilan & Meneses, citados por Corrêa (1982); por Cintra et al. (1983) e por Avilan et al. (1986). Vepraskas & Miner (1986) e Hatano et al. (1988) verificaram que a maior proporção de raízes que crescem dentro dos macroporos ocorreu em solos que apresentaram maiores quantidades e continuidade de macroporos. Esses resultados mostram a importância de o solo possuir poros grandes o suficiente para permitir a entrada inicial das raízes das plantas.

Outra característica do sistema radicular é que este tende a se concentrar na camada superficial, imediatamente acima da compactada (Shierlaw & Alston, 1984; Borges et al., 1988; Garcia et al., 1988; Silva et al., 1992).

Em estudos de comportamento de plantas, diante de problemas de compactação de solo, Miranda et al. (1991) observaram que o feijão-de-porco foi a leguminosa menos afetada. O guandu arbustivo e o feijão-de-porco apresentaram ligeiro declínio no crescimento da parte aérea, mas o seu sistema radicular foi sensivelmente afetado pelo incremento na densidade do solo. O guandu-anão e a crotalária júncea mostraram-se mais sensíveis à presença de camadas compactadas.

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a capacidade das raízes de algumas leguminosas em crescer em camada compactada de solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram testadas cinco espécies de leguminosas com vistas a avaliar a aptidão das raízes de cada uma delas em penetrar em camadas de solo com diferentes níveis de compactação: crotalária júncea (*Crotalaria juncea* L.), guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.), feijão-bravo do ceará (*Canavalia brasiliensis* M. e Benth), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L.) DC) e mata-pasto ou fedegoso (*Senna occidentalis* L.).

O solo utilizado foi coletado no horizonte A de um latossolo vermelho-amarelo álico, muito argiloso, do município de Viçosa (MG). O solo foi seco ao ar e passado em peneira de 4 mm de malha. Por essa ocasião, após a homogeneização do solo, fez-se uma amostragem para caracterizá-lo (EMBRAPA, 1979) quanto à fertilidade natural e textura (Quadro 1).

A unidade experimental foi constituída pela sobreposição de três anéis de PVC: o superior, com 10 cm

Quadro 1. Análises químicas e físicas da amostra do latossolo vermelho-amarelo álico e do caulim utilizado na interface solo-PVC da camada compactada.

Atributos	L Va	Caulim
pH	4,4	4,6
P, mg dm ⁻³	1,8	2,7
K, mg dm ⁻³	22,0	4,0
Ca, mmol dm ⁻³	2	4
Mg, mmol dm ⁻³	4	2
Al, mmol dm ⁻³	8	6
H + Al, mmol dm ⁻³	84	14,9
CTC, mmol kg ⁻¹	91	21
V, %	7,0	26,0
m, %	55,0	50,0
M. O., g kg ⁻¹	48,4	5,6
Areia grossa, g kg ⁻¹	21,0	...
Areia fina, g kg ⁻¹	70	...
Silte, g kg ⁻¹	100	...
Argila, g kg ⁻¹	620	...
Classificação textural	Muito argiloso	...
Ds, kg dm ⁻³	...	1,45
Porosidade total, dm ³ dm ⁻³	...	0,40
Macroporos, dm ³ dm ⁻³	...	0,08
Microporos, dm ³ dm ⁻³	...	0,32

Al³⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺: extraídos com KCl 1 mol L⁻¹; P e K: extraídos com extrator Mehlich1.

de altura e 9,5 cm de diâmetro interno, foi preenchido com solo até 8 cm, o que correspondeu a um volume de 0,567 dm³. Os outros dois anéis possuíam um diâmetro interno de 19,5 cm e alturas de 10 e 12 cm, respectivamente, para o anel intermediário, com volume de 2,987 dm³, e para o anel inferior, de capacidade para 3,584 dm³ de solo. Os anéis superior e inferior foram preenchidos com solo de tal modo que sua densidade fosse de 1,0 kg dm⁻³. Já o anel intermediário apresentava densidade de solo variável conforme o tratamento de compactação, que correspondeu a valores de 1,0, 1,1, 1,2, 1,3 e 1,4 kg dm⁻³.

A compactação foi realizada com o auxílio de uma prensa hidráulica, estando o anel revestido por uma camisa de ferro, para impedir-lhe a deformação durante o processo de compactação. O volume da amostra de solo, para essa operação, foi calculado para se obter um bloco compactado de 11 cm de altura. Inicialmente, essa subamostra foi dividida em quatro outras subamostras, as quais, após receberem os nutrientes e ser umedecidas, foram compactadas. Depois da compactação de cada uma delas, correspondente a uma camada de 2,75 cm, a superfície dessa camada era escarificada com um estilete para permitir melhor contato com a próxima camada a ser compactada, eliminando-se, assim, uma superfície de menor resistência dentro do bloco compactado. Depois da compactação, a camada de solo excedente ao anel, 0,5 cm na parte superior e 0,5 cm na inferior, foi

aparada com arame de aço. Em seguida, o bloco de solo foi retirado do anel usado na compactação, previamente dividido em duas partes, para facilitar essa operação. O bloco de solo compactado foi, então, aparado em toda a circunferência, de modo que o seu diâmetro fosse reduzido para 17,5 cm, ou seja, retirava-se uma camada de 1 cm de espessura. A seguir, o bloco de solo foi colocado dentro de um anel e, em seguida, a interface solo-PVC, preenchida com caulim. Esse preenchimento foi realizado em pequenas camadas, com caulim umedecido, que era compactado com um bastão, até que toda a interface estivesse preenchida. Esse procedimento teve por objetivo impedir que as raízes penetrassem nessa região, fugindo da camada compactada e, assim, atingisse a camada inferior do conjunto, o que foi verificado em testes preliminares.

Depois dessa etapa de preparação do bloco compactado, na sua superfície, foi feita uma escavação de 1 cm de profundidade e 10 cm de diâmetro. Nessa abertura, foi encaixado o anel superior. O inferior, após ter sido preenchido com o solo, foi unido ao intermediário por meio de fita adesiva. Antes disso, a superfície inferior do anel intermediário sofreu uma leve escarificação, com uma escova de aço, para eliminar pontos espelhados no solo, possibilitando assim a continuidade capilar.

Algumas características químicas do caulim utilizado e características físicas após sua compactação (Quadro 1), mostraram condições desfavoráveis para o crescimento radicular.

Para caracterização física da camada compactada da unidade experimental, determinou-se a porosidade total, a macroporosidade e a microporosidade, segundo método propostos pela EMBRAPA (1979). A resistência do solo à penetração foi determinada com um penetrômetro Kiyu modelo SR 2 com cone de 30° de ângulo de vértice e área de base de 2 cm². Nessa determinação, o solo se encontrava com uma umidade de 0,34 kg kg⁻¹, sendo utilizadas três repetições para cada nível de compactação. Em cada uma delas, a resistência foi medida em quatro pontos.

A correção e a adubação do solo foram feitas com base no volume de solo da unidade experimental, com vistas a que fossem fornecidas as mesmas quantidades de corretivos e fertilizantes para cada uma delas. Para esse procedimento, a quantidade de solo, suficiente para preencher cada um dos anéis da unidade experimental, foi separada em saco plástico e se constituiu em uma subamostra. Em cada uma delas, aplicou-se o corretivo CaCO₃ + MgCO₃ (4:1), com base na recomendação de calagem da Comissão... (1989). Após misturado, o solo foi incubado por dez dias, com a umidade em torno de 80% da capacidade de campo, determinada segundo o método proposto por Fernandes & Sykes (1968). Após esse período, o solo foi seco ao ar, passado novamente em peneira de 4 mm de malha, recebendo, em seguida, a adubação com nitrogênio, fósforo e potássio, na forma de KH₂PO₄, H₃PO₄ e KNO₃, de modo a serem acrescentadas as quantidades de 10, 300 e 120 mg dm⁻³ de solo para N, P e K

respectivamente. Após mistura desses nutrientes ao solo, cada subamostra foi novamente umedecida até 80% da capacidade de campo, permaneceu em repouso por 48 horas, para distribuição uniforme da umidade no solo, e foi acondicionada nos anéis.

Cada unidade experimental, após a montagem, foi colocada sobre um prato sem orifício de drenagem. No plantio das leguminosas, utilizaram-se quatro sementes por unidade experimental. Nove dias após a emergência das plântulas, efetuou-se um desbaste deixando apenas duas plântulas. Após a emergência, semanalmente, foi feita uma adubação nitrogenada com 30 mg de N dm⁻³ de solo, utilizando-se como fonte (NH₄)₂ SO₄. As irrigações foram feitas no anel superior, no intermediário e no prato do vaso, duas vezes ao dia, sendo o seu controle feito gravimetricamente.

O experimento teve uma duração de 34 dias a partir do plantio. Após esse período, os anéis que compunham a unidade experimental foram separados, as raízes separadas do solo, determinando-se o comprimento radicular (Tennant, 1975) e calculando-se a densidade radicular para cada anel.

O delineamento experimental adotado foi de blocos casualizados com 25 tratamentos e 5 repetições, em que os tratamentos constituíram um fatorial 5 x 5 (5 leguminosas e 5 níveis de compactação). As médias do fator qualitativo (leguminosas) foram comparadas pelo teste de Student-Newman-Keuls (Steel & Torrie, 1980), ao nível de 5%, e o estudo do fator quantitativo (níveis de compactação), realizado por meio de análise de regressão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Características das amostras compactadas

Os resultados da caracterização física das amostras compactadas são mostrados no quadro 2. Verifica-se que, à medida que a compactação do solo aumentou, houve decréscimos na porosidade total e na macroporosidade das amostras, e acréscimos na microporosidade e na resistência do solo à penetração. Esses resultados demonstram que, à medida que a compactação aumentou, a limitação ao crescimento

radicular também aumentou, especialmente nos dois níveis de maior compactação. Neles, a destruição dos macroporos foi acentuada e, nessas condições, as raízes têm grande dificuldade em penetrar no solo, conforme observado em trabalhos semelhantes (Meredith & Patrick Jr., 1961; Avilan & Menezes, citados por Corrêa, 1982; Cintra et al., 1983; Avilan et al., 1986).

As características químicas e físicas do caulim utilizado para restringir o crescimento radicular na interface solo-PVC (Quadro 1) apresentaram-se como mais limitantes ao crescimento radicular do que aquelas apresentadas pelo solo. O caulim aderiu ao solo, formando um corpo único, não havendo uma superfície de contato de menor resistência, por onde normalmente as raízes tendem a penetrar. Observou-se que, mesmo tendo havido uma pequena penetração de raízes no caulim, especialmente nos níveis mais altos de compactação, ele foi eficiente no impedimento ao crescimento normal de raízes.

Crescimento de raízes em vasos com camada compactada

Os resultados da densidade de raízes das leguminosas cultivadas em vasos com diferentes níveis de compactação, encontram-se no quadro 3. A diferença entre espécies, dentro de um mesmo nível de compactação, é atribuída às características do sistema radicular de cada espécie. O feijão-bravo do ceará e o feijão-de-porco possuem um sistema radicular abundante, ao passo que, no mata-pasto, é bastante reduzido.

Os diferentes níveis de compactação do solo, criados na camada intermediária, proporcionaram reduções significativas na densidade do sistema radicular das espécies testadas, à exceção das raízes de mata-pasto (Quadro 4, Figura 1b). Para essa espécie, de sistema radicular reduzido no seu estágio inicial de crescimento, embora se observe variação na densidade radicular em função da compactação, ela não foi significativa. Por essa razão, o valor estimado (\hat{Y}), para todos os níveis de compactação, foi considerado como igual à média (\bar{Y}). O ajuste de equações de regressão linear simples, com declividade negativa

Quadro 2. Análises físicas de amostras de um latossolo vermelho-amarelo submetido a diferentes níveis de compactação

Densidade do solo	Porosidade			Penetrometria	
	Total	Macro-	Micro-	Resistência à penetração	Umidade da amostra
kg dm ⁻³		dm ³ dm ⁻³		kPa	kg kg ⁻¹
1,0	0,62	0,31	0,31	637	0,31
1,1	0,58	0,28	0,31	883	0,31
1,2	0,54	0,22	0,32	1.471	0,31
1,3	0,50	0,15	0,35	1.765	0,32
1,4	0,46	0,10	0,36	1.961	0,32

Quadro 3. Densidade radicular das leguminosas cultivadas em vasos com diferentes níveis de compactação na camada intermediária de solo

Leguminosa	Anel		
	Superior	Intermediário	Inferior
	cm cm ⁻³		
	Densidade do solo 1,0 kg dm⁻³		
Feijão-de-porco	2,39A	1,09A	1,47A
Feijão-bravo do ceará	1,63A	0,60B	1,56A
Guandu	2,22A	0,52B	0,53B
Crotalária júncea	1,73A	0,32C	1,07AB
Mata-pasto	1,27A	0,15C	0,74B
	Densidade do solo 1,1 kg dm⁻³		
Feijão-de-porco	2,67A	0,57A	1,58A
Feijão-bravo do ceará	2,26A	0,67A	1,95A
Guandu	2,26A	0,26B	0,56B
Crotalária júncea	2,98A	0,15B	0,60B
Mata-pasto	1,30A	0,11B	0,80B
	Densidade do solo 1,2 kg dm⁻³		
Feijão-de-porco	2,59A	0,55A	1,29A
Feijão-bravo do ceará	2,12A	0,46A	1,55A
Guandu	2,85A	0,22B	0,52B
Crotalária júncea	3,12A	0,12B	0,93AB
Mata-pasto	1,19A	0,07B	1,06AB
	Densidade do solo 1,3 kg dm⁻³		
Feijão-de-porco	3,78A	0,49A	1,16B
Feijão-bravo do ceará	4,09A	0,28B	1,85A
Guandu	3,98A	0,18C	0,19C
Crotalária júncea	4,24A	0,03C	0,14C
Mata-pasto	1,31A	0,05C	0,71C
	Densidade do solo 1,4 kg dm⁻³		
Feijão-de-porco	7,73A	0,22AB	0,55A
Feijão-bravo do ceará	5,34B	0,35A	1,39A
Guandu	5,02B	0,12BC	0,02B
Crotalária júncea	4,10B	0,01C	0,00B
Mata-pasto	2,28C	0,05BC	0,35B

Para uma mesma densidade, médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Student-Newman-Keuls, ao nível de 5%.

para o feijão-de-porco, feijão-bravo do ceará e crotalária júncea, indicam que essas leguminosas apresentaram redução do crescimento radicular com o aumento da compactação. A maior declividade negativa, apresentada pelo feijão-de-porco, mostra que essa espécie apresentou a maior redução do crescimento radicular com o aumento da densidade do solo. Esse comportamento foi seguido, em segundo lugar, pelo feijão-bravo do ceará e, por último, pela crotalária júncea. As raízes da crotalária não penetraram no solo com maior densidade e, já no bloco de densidade de 1,3 kg dm⁻³,

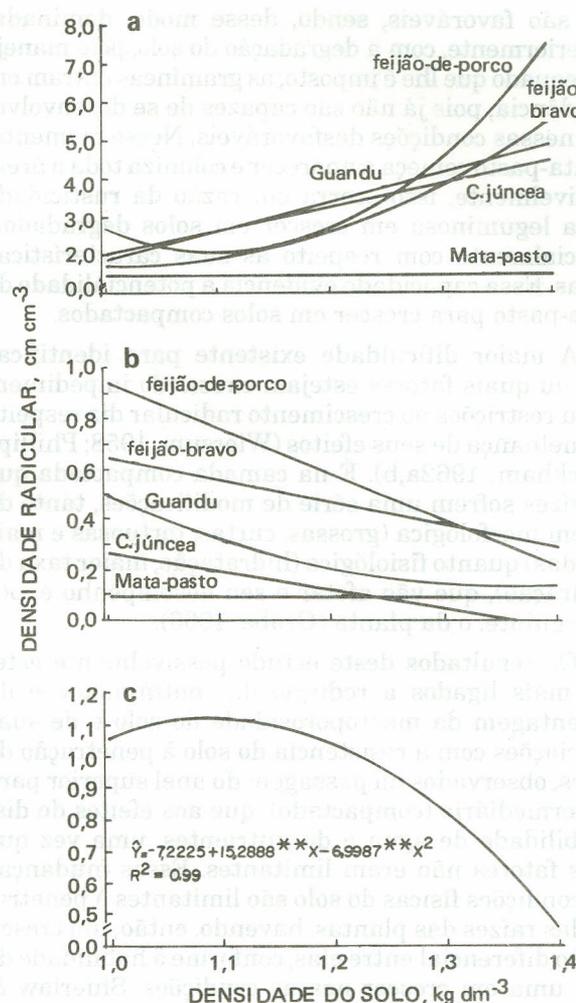


Figura 1. Densidade radicular de leguminosas no anel superior (a), no intermediário (b) e no inferior (c), em função dos níveis de compactação do anel intermediário, em kg dm⁻³.

apresentaram-se bastante deformadas, tortuosas, grossas e curtas. Nas outras duas espécies esses sintomas ocorreram em menor intensidade.

No guandu, os aumentos na densidade do solo até 1,35 kg dm⁻³ (ponto de mínimo) tenderam a reduzir o crescimento radicular e, a partir desse ponto, dentro do intervalo estudado, o crescimento se manteve praticamente constante. Isso implica dizer que o guandu reduziu a densidade radicular de forma mais acentuada nos primeiros níveis de compactação, e manteve um crescimento constante, a partir dos níveis de maior compactação.

A compactação do solo não afetou significativamente o crescimento das raízes do mata-pasto, que apresentou um valor médio de densidade radicular igual a 0,09 cm cm⁻³. Essa leguminosa, muito comum em pastagens degradadas, é apontada por muitos pecuaristas como responsável pelo seu declínio, daí o nome mata-pasto. Entretanto, acredita-se que, dado o seu crescimento inicialmente lento, ela não consegue competir com as gramíneas quando as condições do

solo são favoráveis, sendo, desse modo, dominada. Posteriormente, com a degradação do solo, pelo manejo inadequado que lhe é imposto, as gramíneas entram em decadência, pois já não são capazes de se desenvolverem nessas condições desfavoráveis. Nesse momento, o mata-pasto começa a aparecer e coloniza toda a área. Possivelmente, isso ocorra em razão da rusticidade dessa leguminosa em crescer em solos degradados, especialmente com respeito às suas características físicas. Essa capacidade evidencia a potencialidade do mata-pasto para crescer em solos compactados.

A maior dificuldade existente para identificar qual ou quais fatores estejam causando impedimentos ou restrições ao crescimento radicular diz respeito à semelhança de seus efeitos (Wiersum, 1958; Phillips e Kirkham, 1962a,b). É na camada compactada que as raízes sofrem uma série de modificações, tanto de origem morfológica (grossas, curtas, tortuosas e mais pesadas) quanto fisiológica (hidratação, maior taxa de respiração), que vão afetar o seu desempenho e, por conseguinte, o da planta (Grabe, 1966).

Os resultados deste estudo possivelmente estejam mais ligados à redução da continuidade e da percentagem da macroporosidade do solo e de suas associações com a resistência do solo à penetração de raízes, observados na passagem do anel superior para o intermediário (compactado), que aos efeitos de disponibilidade de água e de nutrientes, uma vez que esses fatores não eram limitantes. Essas mudanças nas condições físicas do solo são limitantes à penetração das raízes das plantas, havendo, então, um crescimento diferencial entre elas, conforme a habilidade de cada uma em crescer nessas condições. Shierlaw & Alston (1984) verificaram que a compactação do solo diminui o número de poros grandes, similar em tamanho e em diâmetro às raízes das plantas, aumentando o grau de dificuldade para as raízes mais grossas penetrarem no solo compactado. Tem sido mostrado também que, quando a macroporosidade do solo é reduzida a valores inferiores a $0,15 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$, o cres-

cimento das raízes é limitado (Meredith & Patrick Jr., 1961; Avilan & Meneses, citados por Corrêa, 1982; Cintra et al., 1983; Avilan et al., 1986). A macroporosidade das amostras de solo utilizadas (Quadro 2) atingiu esse limite quando a densidade foi de $1,3 \text{ kg dm}^{-3}$, e reduziu até $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$ no nível de maior compactação.

A resistência do solo é outra característica limitante na penetração de raízes. Nesse sentido, Gill & Bolt (1955) observaram que o crescimento de raízes em solo compactado deve-se à menor pressão oferecida pelo solo que à maior pressão exercida pelas raízes. Possivelmente a resistência apresentada pelo solo causasse alterações morfológicas nas raízes, evidências claras de crescimento através dos pontos de menor resistência oferecidos pelo solo. Trabalhando com soja, Borges et al. (1988) observaram resultados semelhantes.

Somente o mata-pasto não apresentou um acúmulo significativo de raízes no anel superior do vaso, à medida que a compactação foi aumentada (Figura 1a). O guandu e a crotalária júncea revelaram tendências semelhantes, em que o ajuste da densidade radicular com a densidade do solo, através de equações de regressão linear simples, com declividades positivas, relaciona-se a aumentos crescentes na densidade radicular a partir do primeiro nível de compactação. Esse incremento foi ligeiramente superior para o guandu. O feijão-de-porco, para pequenos aumentos de compactação, reduziu a densidade radicular até um ponto de mínimo ($1,1 \text{ kg dm}^{-3}$); entretanto, a partir daí, o acúmulo de raízes aumentou. Já para o feijão-bravo do ceará, houve aumento da densidade radicular no anel superior quando a compactação do solo aumentou, apresentando maior acúmulo a partir da densidade $1,3 \text{ kg dm}^{-3}$. Esse maior acúmulo de raízes no anel superior a partir da densidade de $1,3 \text{ kg dm}^{-3}$ coincide com as reduções da densidade radicular no anel inferior (Figura 1c) e com as reduções da macroporosidade, mais acentuadas a partir desse nível de

Quadro 4. Equações de regressão ajustadas entre a densidade radicular das leguminosas (Y), em cm cm^{-3} , e a densidade do solo na camada intermediária do vaso (X), em kg dm^{-3}

Leguminosa	Anel	Equação	R ²
Crotalária júncea	Superior	$\hat{Y} = -3,9657 + 5,9998X$	0,88**
	Intermediário	$\hat{Y} = 0,9960 - 0,7286X$	0,90**
Guandu	Superior	$\hat{Y} = -5,5148 + 7,3170X$	0,91**
	Intermediário	$\hat{Y} = 5,4177 - 7,7804X$	0,82**
Feijão-bravo do ceará	Superior	$\hat{Y} = 26,1399 - 48,4641X + 24,0455X^2$	0,95*
	Intermediário	$\hat{Y} = 1,5412 - 0,8919X$	0,73**
Feijão-de-porco	Superior	$\hat{Y} = 76,9884 - 135,7640X + 61,4802X^2$	0,95**
	Intermediário	$\hat{Y} = 2,7634 - 1,8163X$	0,84**
Mata-pasto	Superior	$\hat{Y} = \bar{Y} = 1,47$	-
	Intermediário	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0,09$	-

** e * = significativo ao nível de 1 e 10%, respectivamente, pelo teste F.

compactação. Isso possivelmente tenha a ver com a maior restrição ao crescimento radicular, dentro da camada compactada, para maiores níveis de compactação, dificultando as raízes de alcançar o solo do terceiro anel. Esse comportamento diferencial entre as espécies evidencia as características particulares de cada uma delas para concentrar o seu crescimento radicular na camada superficial, quando existir restrições ao seu crescimento em subsuperfície. Diversos pesquisadores (Shierlaw & Alston, 1984; Silva et al., 1985; Borges et al., 1988; Garcia et al., 1988) têm observado uma tendência de as plantas acumularem mais raízes na camada acima daquela compactada.

No anel inferior do vaso, as leguminosas apresentaram um comportamento semelhante. A ausência de um efeito significativo para a interação leguminosa versus nível de compactação possibilitou que se comparassem os efeitos da compactação pela média das leguminosas (Figura 1c). O ajuste desses dados a uma equação quadrática $\hat{Y} = -7,2225 + 15,2888 * X - 6,9987 * X^2$, $R^2 = 0,99$, e com um ponto de máximo numa densidade do solo de $1,09 \text{ kg dm}^{-3}$, permitiu verificar que, para aumentos de compactação, as leguminosas tenderam a acumular uma quantidade de raízes pouco superior àquela observada no menor nível de compactação. A partir daí, novos aumentos na densidade do solo proporcionaram redução na densidade radicular. Esses resultados parecem estar ligados à capacidade das raízes de penetrar na camada compactada do solo, em que se observou uma redução no crescimento de raízes à medida que se aumentou o nível de compactação (Quadro 4 e Figura 1b). Desse modo, menores quantidades de raízes atingiram o terceiro anel, em favor de uma concentração no anel acima da camada compactada. Observou-se, também, que houve uma tendência de algumas leguminosas compensarem a limitação de crescimento na camada compactada aumentando a quantidade de raízes no terceiro anel (Quadro 3). O feijão-de-porco e, especialmente, o feijão-bravo do ceará emitiram mais raízes secundárias no solo do terceiro anel. Esse comportamento é interessante, pois permite à leguminosa explorar um maior volume de solo, pelo seu comprimento radicular também maior.

O feijão-de-porco e o feijão-bravo do ceará, possivelmente pelo maior crescimento da parte aérea e pelas características de um sistema radicular constituído por raízes mais grossas, foram as duas espécies mais afetadas pela compactação. Por outro lado, o mata-pasto foi a leguminosa menos prejudicada. Sua raiz pivotante penetrou na camada compactada até $1,4 \text{ kg dm}^{-3}$, atravessando-a onde as evidências de deformação dessas raízes foram menos acentuadas que para as outras espécies.

CONCLUSÕES

1. As leguminosas, com exceção do mata-pasto, reduziram significativamente a densidade do sistema radicular dentro da camada compactada e abaixo dela, e apresentaram um acúmulo de raízes no anel

superior do vaso, à medida que se elevou o nível de compactação.

2. O mata-pasto, apesar da baixa densidade radicular no seu estágio inicial de crescimento, sobressaiu como a espécie com maior potencial para penetrar suas raízes em camadas compactadas da classe de solo estudada.

LITERATURA CITADA

- ALVARENGA, R.C. Potencialidades de adubos verdes para conservação e recuperação de solos. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1993. 112p. (Tese de Doutorado)
- ALVARENGA, R.C.; CRUZ, J.C. & PACHECO, F.B. Preparo do solo. *Inf. Agropec.*, Belo Horizonte, 13(147):40-45, 1987.
- AVILAN, L.; LEAL, F.; MENESES, L.; SUCRE, R. & GARCIA, M.L. Distribución del sistema radical de las cítricas en algunos suelos de Venezuela. *Fruits*, Paris, 41:655-668, 1986.
- BORGES, E.N.; NOVAIS, R.F.; REGAZZI, A.J.; FERNANDES, B. & BARROS, N.F. Respostas de variedades de soja à compactação de camadas de solo. *R. Ceres*, Viçosa, 35:553-568, 1988.
- CINTRA, F.L.D.; MIELNICZUK, J. & SCOPEL, I. Caracterização do impedimento mecânico em um latossolo roxo do Rio Grande do Sul. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 7:323-327, 1983.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 4.ª aproximação. Lavras, 1989. 176p.
- CORRÊA, L.S. Distribuição do sistema radicular de cultivares de abacateiro (*Persea* spp.) num solo podzólico vermelho-amarelo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1982. 45p. (Tese de Doutorado)
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, EMBRAPA, 1979. s.n.
- FERNANDES, B. & SYKES, D.J. Capacidade de campo e a retenção de água em três solos de Minas Gerais. *R. Ceres*, Viçosa, 15:1-39, 1968.
- GARCIA, F.; CRUZE, R.M. & BLACKMER, A.M. Compaction and nitrogen placement effect on root growth, water depletion, and nitrogen uptake. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 52: 792-798, 1988.
- GILL, W.R. & BOLT, G.H. Pfeffer's studies of root growth pressure exerted by plants. *Agron. J.*, Madison, 47:166-168, 1955.
- GRABE, A.R. Soil aeration and plant growth. *Adv. Agron.*, Madison, 18:57-106, 1966.
- HATANO, R.; IWANAGA, K.; OKAJIMA, H. & SAKUMA, T. Relationship between the distribution of soil macropores and root elongation. *Soil Sci. Plant Nutr.*, Tóquio, 34:535-546, 1988.
- MEREDITH, H.L. & PATRICK JR., W.H. Effects of soil compaction on subsoil root penetration and physical properties of three soils in Louisiana. *Agron. J.*, Madison, 53:163-167, 1961.
- MIRANDA, J.; FORTES, J.L.O.; RUIZ, H.A. & FONTES, L.E.F. Crescimento de leguminosas em cilindros de solo com camada compactada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 23., Porto Alegre, 1991. Programa e Resumos. Campinas, SBSC, 1991. p. 172.

- PHILLIPS, R.E. & KIRKHAM, D. Soil compaction in the field and corn growth. *Agron. J.*, Madison, 54:29-34, 1962a.
- PHILLIPS, R.E. & KIRKHAM, D. Mechanical impedance and corn seedling root growth. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison, 26:319-326, 1962b.
- ROSENBERG, N.J. & WILLITS, N.A. Yields and physiological response of barley and beans grown in artificially compacted soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison, 26:78-82, 1962.
- SHIERLAW, J. & ALSTON, A.M. Effects of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. *Plant Soil*, The Hague, 77:15-28, 1984.
- SILVA, G.P.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L. & BARROS, N.F. Respostas de espécies de gramíneas forrageiras a camadas compactadas de solo. *R. Ceres*, Viçosa, 39:31-43, 1992.
- STEEL, R.G.D. & TORRIE, J.H. Principles and procedures of statistics. 2. ed., New York, Mc Graw-Hill Book, 1980. 438p.
- TENNANT, D.A. Test of a modified line intersect method of estimating root length. *Ecology*, Dordrecht, 63:995-1001, 1975.
- THOMPSON, P.J.; JANSEN, I.J. & HOOKS, C.L. Penetrometer resistance and bulk density as parameters for predicting root system performance in mine soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 51:1288-1293, 1987.
- VEPRASKAS, M.J. & MINER, G.S. Effects of subsoiling and mechanical impedance on tobacco root growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 50:423-427, 1986.
- VEPRASKAS, M.J.; MINER, G.S. & PEEDIN, G.F. Relationships of dense tillage pans, soil properties and subsoiling to tobacco root growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 50: 1541-1546, 1986.
- VEPRASKAS, M.J. & WAGGER, M.G. Corn root distribution and yield response to subsoiling for Paleudults having different aggregate sizes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 54:849-854, 1990.
- WIERSUM, L.K. The relationship of size and structural rigidity of pores to their penetration by roots. *Plant Soil*, The Hague, 9:75-85, 1958.
- MIRANDA, J.; FORTES, J.L.O.; RUIZ, H.A. & FONTES, L.E.N. Crescimento de leguminosas em cilindros de solo com camadas compactadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 23. Porto Alegre, 1991. Programa e Resumos. Campinas, SBCS, 1991. p. 173.
- MEREDITH, H.L. & PATRICK JR., W.H. Effects of soil compaction on subsoil root penetration and physical properties of three soils in Louisiana. *Agron. J.*, Madison, 53:163-167, 1961.
- HATANO, R.; IWANAGA, K.; OKAJIMA, H. & SAKUMA, T. Relationship between the distribution of soil macropores and root elongation. *Soil Sci. Plant Nutr.*, Tokyo, 34:533-546, 1988.
- GRABE, A.R. Soil aeration and plant growth. *Adv. Agron.*, Madison, 18:57-106, 1966.
- GILL, W.R. & BOUT, G.H. Pflanz's studies of root growth pressure exerted by plants. *Agron. J.*, Madison, 47:166-168, 1955.
- 1988.
- GARCIA, F.; CRUZE, R.M. & BLACKMER, A.M. Compaction and nitrogen placement effect on root growth, water depletion, and nitrogen uptake. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 52:792-798, 1988.
- FERNANDES, B. & SYKES, D.J. Capacidade de campo e retenção de água em três solos de Minas Gerais. *R. Ceres*, Viçosa, 15:1-33, 1968.
- EMBRAPA, 1979. an.
- Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, EMBRAPA, 1979.
- Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA).
- Correia, L.S. Distribuição do sistema radicular de cultivares de abacateiro (*Persea spp.*) num solo pedregoso vermelho-amarelo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1982. 45p. (Tese de Doutorado)
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 4ª aproximação. Lavras, 1983. 176p.
- CINTRA, E.L.D.; MIELNICZUK, J. & SCOPPEL, I. Caracterização de impedimento mecânico em um latossolo roxo do Rio Grande do Sul. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 7:323-327, 1983.
- BARROS, N.F. Respostas de variedades de soja a compactação de camadas de solo. *R. Ceres*, Viçosa, 35:553-568, 1988.
- BORGES, E.M.; NOVAIS, R.F.; REGAZZI, A.L.; FERNANDES, B. & BARROS, N.F. Respostas de variedades de soja a compactação de camadas de solo. *R. Ceres*, Viçosa, 35:553-568, 1988.

CONCLUSÕES

1. As leguminosas, com exceção do mata-pasto, reduzem significativamente a densidade do sistema radicular dentro da camada compactada e abaixo dela, e apresentam um acúmulo de raízes no anel