

CRESCIMENTO RADICULAR DE PLÂNTULAS DE MILHO AFETADO PELA RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO¹

CIRO ANTONIO ROSOLEM², ELENA MERCEDES FERNANDEZ³, MARCELO ANDREOTTI³
e CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL³

RESUMO - A resistência do solo à penetração é relacionada com a textura, compactação e umidade do solo. No presente trabalho se estudou o efeito da interação desses fatores sobre o crescimento de raízes de milho. Materiais de solo com 22, 30, 34, 41 e 48% de argila foram acondicionados em tubos de PVC de 10 cm com 4,3 cm de diâmetro interno, nas densidades globais de 1,07, 1,18, 1,36 e 1,53 g cm⁻³, em três tensões de água: -0,034, -0,106 e -0,640 MPa. Plântulas de milho foram cultivadas nos tubos por 48 horas. Quando a densidade do solo é baixa, a textura tem papel preponderante no crescimento radicular. Esse efeito é menor à medida que aumenta a densidade global. O aumento da resistência do solo à penetração causa diminuição no comprimento e número de raízes seminais adventícias; a raiz seminal primária mostra menor capacidade de penetração do que as raízes seminais adventícias. Resistências do solo à penetração da ordem de 1,3 MPa reduzem à metade o crescimento das raízes seminais adventícias do milho.

Termos para indexação: água do solo, compactação, densidade global, textura do solo.

ROOT GROWTH OF CORN SEEDLINGS AS AFFECTED BY SOIL RESISTANCE TO PENETRATION

ABSTRACT - The soil resistance to penetration is affected by soil texture, compaction and moisture content. In this paper, the effects of the interaction of these factors on corn root growth was studied. Soil materials with 22, 30, 34, 41 and 48% of clay were packed in PVC tubes 10 cm high, with 4.3 cm of internal diameter to reach bulk densities of 1.07, 1.18, 1.36 and 1.53 g cm⁻³. Water was added to reach water potentials of -0.034, -0.106 and -0.640 MPa. Corn seedlings were grown in the tubes for 48 hours. When the soil bulk density was low, root growth was affected mainly by soil texture. As soil bulk density increased, there was a decrease in the effect of soil texture on root growth. The increase in soil strength caused a decrease in root length and in the number of seminal adventitious roots. The primary roots showed a lower penetration ability when compared to seminal adventitious roots. A soil resistance of 1.3 MPa caused a 50% decrease in seminal adventitious corn roots.

Index terms: soil water, compaction, bulk density, soil texture.

INTRODUÇÃO

Durante as operações de preparo do solo e semeadura são aplicadas forças compactativas que afetam a resistência do solo à penetração (Voorhees et al., 1989), o que ocorre devido às modificações das condições físicas do mesmo. A alta resistência

mecânica que se estabelece causa prejuízo ao crescimento radicular (Taylor & Ratcliff, 1969). A resistência à penetração é devida a dois fatores: a) "incompressão" das partículas primárias e b) fricção entre partículas primárias e agregados durante o movimento relativo da raiz (Groenevelt et al., 1984); ou, melhor, a resistência à penetração é resultante de forças oriundas da compactação, que é definida pela densidade aparente, do teor de água e da textura do solo. O tamanho das partículas afeta o crescimento radicular, porque modifica o ângulo de deflexão (Bandara & Fritton, 1986).

A compactação modifica o comprimento, diâmetro e distribuição das raízes de milho no solo

¹ Aceito para publicação em 22 de julho de 1998.

² Eng. Agr., Dr., Prof. Titular, Dep. de Agricultura e Melhoramento Vegetal, FCA/UNESP, Caixa Postal 237, CEP 18603-970 Botucatu, SP. Bolsista do CNPq. E-mail: rosolem@fca.unesp.br

³ Eng. Agr., M.Sc., Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Agricultura, FCA/UNESP, Botucatu.

(Shierlaw & Alston, 1984), que por sua vez pode interferir no crescimento e na taxa de absorção de nutrientes (Barber et al., 1988) e água pela raiz (Kuchenbuch & Barber, 1987).

A distribuição espacial das raízes tem efeito na absorção de água, porque a absorção se dá em um raio médio de 2 cm (Tardieu, 1988).

O nível de água no solo é o principal fator que afeta a taxa de crescimento da raiz de milho (Barber et al., 1988). Mackay & Barber (1985) observaram que o comprimento da raiz aumentava de 41 a 52% quando o conteúdo volumétrico de água foi incrementado de 0,22 a 0,27 m³, mas a partir deste teor o crescimento diminuiu. O conteúdo de água no solo afeta a relação entre resistência do solo à penetração e o alongamento da raiz.

Embora se conheça o efeito da compactação e da água do solo sobre o crescimento radicular de milho, não se tem avaliado o efeito conjunto em solos de diferentes texturas.

No presente trabalho objetivou-se o estudo dos efeitos das interações água x textura do solo x resistência à penetração sobre o crescimento de raízes de milho.

MATERIAL E MÉTODOS

Através da mistura de material proveniente das camadas aráveis de um Latossolo Vermelho-Escuro álico e de um Latossolo Roxo Álico foram obtidos os materiais com as características mostradas na Tabela 1. Os conteúdos de areia e argila foram determinados pelo método de Bouyoucos (1932). Por facilidade, cada um destes materiais foi considerado como um solo, com sua respectiva textura.

Amostras de cada um dos solos originais foram tomadas e analisadas quanto à fertilidade segundo Raij & Quaggio (1983). Cada um dos materiais originais teve sua saturação por bases corrigida para 70%.

TABELA 1. Caracterização textural dos solos.

Solo	Areia (%)	Argila (%)
1	73	22
2	59	30
3	47	34
4	37	41
5	23	48

Foi determinada a curva de retenção de água e o volume de microporos dos 5 solos obtidos, através de centrífuga, determinando-se as retenções de água às seguintes tensões: -0,06; -0,10; -0,33; -1,00 e -1,5 MPa (Moraes, 1982).

Foram estabelecidos como tratamentos as seguintes tensões de água: -0,034; -0,106 e -0,640 MPa.

Cilindros de PVC de 10 cm de comprimento por 4,30 cm de diâmetro foram preenchidos com uma quantidade de solo correspondente às densidades de 1,07, 1,18, 1,36 e 1,53 g cm⁻³. A compactação foi realizada mediante golpes com um cilindro de ferro. Foi avaliada a resistência do solo à penetração tanto na parte inferior como superior do cilindro, por meio de penetrômetro de bolso. A média das duas determinações foi utilizada na discussão dos resultados.

Em função da variação no conteúdo de água, as densidades globais obtidas não foram idênticas em todas as texturas. Assim, nas Tabelas são apresentadas, para referência e por simplicidade, as médias de densidade globais das 5 texturas.

Sementes de milho híbrido XL 370 foram colocadas em germinador a 25°C durante 48 horas. Plântulas com radículas entre 2,0 e 3,0 cm de comprimento foram transferidas para os tubos de PVC. O comprimento inicial foi descontado do comprimento ao final do experimento.

Os cilindros de PVC foram envolvidos em sacos de polietileno e colocados em câmaras de germinação a 30°C durante 48 horas. Após este período, foi avaliado o comprimento da raiz primária, comprimento e número de raízes seminais adventícias.

O experimento foi conduzido e avaliado como um fatorial 5 (texturas) x 3 (umidades) x 4 (densidades globais), inteiramente casualizado, com 3 repetições.

Os resultados foram submetidos a análise de variância, e a comparação das médias foi feita utilizando-se o teste de Tukey a 5% de probabilidade. Com o conjunto de dados do experimento colocado em eixos cartesianos descrevendo o crescimento radicular em função da resistência do solo à penetração, foi possível ajustar equações mostrando o limite de crescimento radicular em cada resistência.

Determinou-se, ainda, o Q_{1/2}, definido como a resistência à penetração em que o crescimento radicular é reduzido à metade (Dexter, 1987). Este valor foi obtido por interpolação na equação correspondente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resumo dos resultados da análise de variância dos dados do experimento encontram-se na

Tabela 2. Considerando-se o nível de 5% de probabilidade, nota-se que a interação tripla não foi significativa em qualquer dos casos. O teor de água do solo somente afetou significativamente a resistência do solo à penetração. Por outro lado, o sistema radicular do milho foi afetado pela textura e densidade do solo, havendo interação destes fatores no caso de comprimento de raízes seminais e comprimento total.

Resistência do solo à penetração em função da densidade global

A compactação do solo modifica a resistência à penetração oferecida por este, dependendo das características intrínsecas do mesmo (Fig. 1). Os solos com mais de 40% de argila apresentaram uma relação logarítmica entre a resistência e a densidade. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por outros pesquisadores (Gerard et al., 1982; Shierlaw & Alston, 1984). Entretanto, nos solos mais arenosos, o incremento da resistência do solo em função da compactação é menos acentuado, tendo-se obtido relações quadráticas. Por outro lado, no solo mais arenoso (22% de argila), os tratamentos levaram à obtenção do maior valor de densidade global, mas as resistências à penetração aumentaram em menor proporção que em texturas mais argilosas, tendo como consequência a menor resistência.

O comportamento dos solos pode ser agrupado de acordo com os conteúdos de argila (mais de 40% e menos de 40%). Dentro de cada grupo houve uma relação lógica, pois os solos de maior conteúdo de

argila em cada um dos grupos foram os que alcançaram os maiores valores de resistência à penetração. Dentro da mesma densidade global, quanto mais argila, maior foi a resistência à penetração.

Resistência do solo à penetração em função da água

A resistência apresentada pelo solo pode ser expressa como uma função de seu conteúdo de água (Fig. 2). A variação foi maior nos solos com mais de 40% de argila. Embora a resistência tivesse um incremento com a diminuição do conteúdo de água no solo, o efeito foi maior quando o nível passou da capacidade de campo a $-0,1$ MPa. Veen & Boone (1990) observaram que sob baixa resistência do solo, as raízes são mais sensíveis ao conteúdo de água.

Crescimento radicular

O comportamento radicular pode ser modificado pelas condições do ambiente onde estas se desenvolvem. Observou-se (Tabela 3) que o número de raízes seminais adventícias foi alterado tanto pela textura como pela densidade aparente do solo, havendo interação dos fatores.

Nos solos argilosos (41 e 48% de argila), observou-se o menor número de raízes seminais adventícias, que, nestes casos, não variou com a densidade global. Nestas condições é que foram observadas as maiores resistências à penetração (Fig. 1). Logsdon et al. (1992) observaram, em um solo argiloso, que o aumento da compactação do solo diminuía o nú-

TABELA 2. Resumo da análise de variância dos resultados obtidos.

Causa da variação	Probabilidade > F				
	Número de raízes	Comprimento de raízes			Resistência do solo
		Principal	Seminais	Total	
Textura do solo	0,034	0,064	0,001	0,001	0,001
Densidade do solo	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Teor de água	0,338	0,542	0,965	0,558	0,001
Tex. x densidade	0,165	0,511	0,045	0,062	0,001
Tex. x água	0,782	0,403	0,875	0,681	0,004
Densidade x água	0,794	0,651	0,885	0,750	0,006
Tex. x den. x água	0,584	0,659	0,242	0,134	0,510
CV (%)	19,1	29,6	45,8	27,6	12,8

mero de raízes, pois as raízes cresciam ao redor dos torrões densos e não em seu interior. Nos outros solos, à medida que aumenta o conteúdo de areia, o

efeito da densidade sobre o desenvolvimento das raízes é mais significativo. Martin et al. (1985) observaram, em um solo limoso (limo 76,9% e

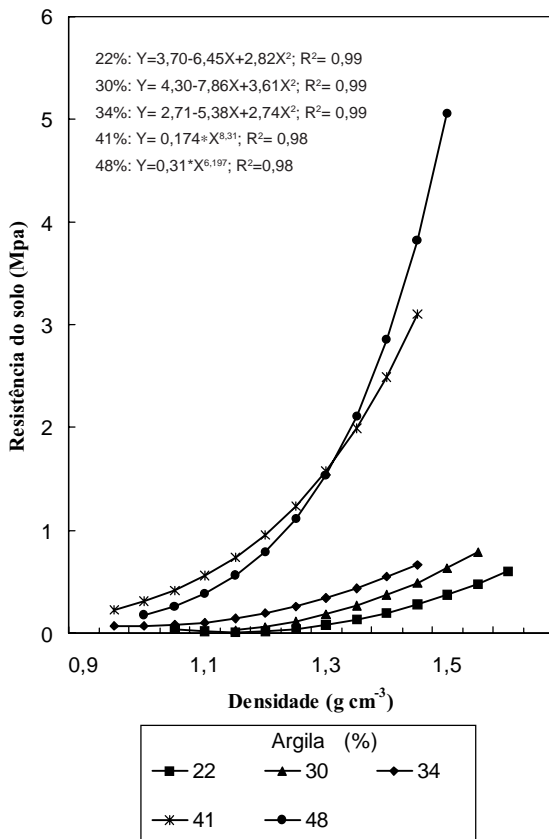


FIG. 1. Relação entre a resistência e a densidade em cinco solos diferentes, classificados quanto ao teor de argila.

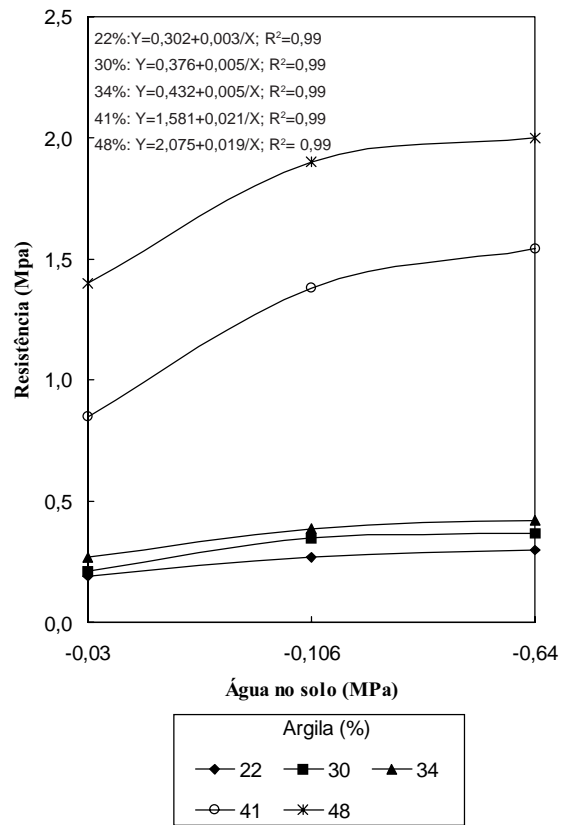


FIG. 2. Relação entre a resistência e a água em cinco solos diferentes, classificados quanto ao teor de argila.

TABELA 3. Número de raízes seminais adventícias em função do tipo de solo e densidade¹.

Argila (%)	Densidade global ($g\ cm^{-3}$)				Média
	1,07	1,18	1,38	1,53	
22	2,00Bc	3,00Abc	2,50ABa	2,00Ba	2,38bc
30	4,17Aa	3,33Bab	1,50Cbc	2,00Ca	2,75ab
34	4,17Aa	3,83Aa	2,00Bab	1,67Ba	2,92a
41	3,17Ab	2,50Acd	0,83Cc	1,67Ba	2,04c
48	1,50Ac	1,83Ad	1,33Abc	1,83Aa	1,62d
Média	3,00A	2,90A	1,63B	1,83B	

¹ Letras diferentes maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas indicam diferença significativa (Tukey, $p<0,05$).

areia 9%), que um incremento da densidade de 1,50 a 1,66 g cm⁻³ causou diminuição no número de raízes adventícias.

No solo arenoso (22% de argila) com 73% de areia, tanto na baixa como na alta densidade o número de raízes foi diminuído. Na baixa densidade, o solo estava muito solto. Kooistra et al. (1992) constataram que as raízes têm maior crescimento quando o contato destas com o solo aumenta, e este foi proporcional ao incremento da fração das partículas sólidas no volume de solo. No solo solto, o crescimento ocorre na interface da partícula sólida com o poro.

O crescimento da raiz seminal primária (Tabela 4) foi modificado tanto pela textura como pela densidade global do solo. Em baixa densidade, os solos com 22 e 41% de argila, respectivamente, foram os que apresentaram o maior crescimento radicular. Nos níveis de compactação intermediários, o ambiente foi mais adequado ao crescimento

radicular nos solos mais arenosos, que apresentavam menores resistências à penetração (Fig. 1). Na densidade global mais alta, exceto o solo com 48% de argila, o comportamento dos solos foi semelhante, mesmo com diferentes resistências à penetração.

O solo mais argiloso (48% de argila) foi o que mais inibiu o crescimento da raiz seminal primária. Bandara & Fritton (1986) observaram que quando a densidade aumenta de 1,1 a 1,3 g cm⁻³ diminui o ângulo de deflexão, por isso em solos com alta proporção de partículas finas, as raízes encontrariam um obstáculo maior ao crescimento.

O crescimento das raízes seminais adventícias (Tabela 5) foi afetado também pela textura e pela densidade global do solo.

Nos solos argilosos observou-se o menor crescimento das raízes seminais adventícias, sendo o efeito mais pronunciado com o maior conteúdo de argila.

TABELA 4. Comprimento da raiz seminal primária em função do tipo de solo e densidade¹.

Argila (%)	Densidade global (g cm ⁻³)				Média
	1,07	1,18	1,38	1,53	
	----- (cm) -----				
22	10,48Aa	5,98Cbc	7,97Ba	4,41Ca	7,21a
30	9,30Ab	7,88Ba	5,45Cb	4,32Ca	6,74a
34	7,10Ac	6,55Ab	4,08Bc	4,32Ba	5,51b
41	11,08Aa	3,75BCd	4,57Bbc	3,37Ca	5,69b
48	7,47Ac	5,33Bc	2,53Cd	1,63Cb	4,24c
Média	9,09A	5,90B	4,92C	3,61D	

¹ Letras diferentes maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas indicam diferença significativa (Tukey, p<0,05).

TABELA 5. Comprimento de raízes seminais adventícias em função do tipo de solo e densidade¹.

Argila (%)	Densidade global (g cm ⁻³)				Média
	1,07	1,18	1,38	1,53	
	----- (cm) -----				
22	13,35Bd	23,53Ab	6,95Cab	6,97Cb	12,70b
30	43,97Aa	17,93Bc	5,53Db	8,75Ca	19,04a
34	33,43Ab	33,08Aa	8,53Ba	4,32Cc	19,84a
41	19,40Ac	13,68Bd	2,22Cc	3,61Cc	9,73c
48	6,25Ae	7,93Ae	1,85Bc	3,45Bc	4,87d
Média	23,28A	19,23B	5,02C	5,42C	

¹ Letras diferentes maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas indicam diferença significativa (Tukey, p<0,05).

O valor da densidade global em que o crescimento radicular foi significativamente afetado foi diferente em cada solo. No maior teor de argila (48%) o crescimento radicular foi significativamente diminuído nas densidades de 1,36 g cm⁻³ ou maiores, enquanto que no solo com 41% de argila, na densidade de 1,18 g cm⁻³ já havia prejuízo. No solo com 22% de argila, a densidade de 1,27 g cm⁻³ foi a que permitiu o melhor desenvolvimento das raízes. Martin et al. (1985), trabalhando em um solo com baixo conteúdo de argila (14,1%), porém limoso (76,9% de limo), observaram que o comprimento da raiz foi reduzido quando houve incremento da densidade global de 1,5 para 1,66 g cm⁻³.

O crescimento total da raiz (Fig. 3) foi alterado pelas características do solo, no caso, textura e densidade. Observou-se que o crescimento diminuiu com o aumento da densidade do solo, fato também observado por Shierlaw & Alston (1984).

As texturas de 22 a 34% de argila permitiram o maior crescimento radicular total. Uma vez que com 22% de argila as raízes adventícias foram muito prejudicadas, os solos que apresentaram as melhores condições para o desenvolvimento radicular foram aqueles com 30 e 34% de argila. Esses dois solos apresentam condições físicas intermediárias ao solo arenoso (22% de argila) que apresentava alta macroporosidade, prejudicando o ancoramento das raízes, enquanto os solos argilosos (48 e 41% de argila) restringiram o crescimento por impedimento mecânico às raízes. Shierlaw & Alston (1984) observaram que em um solo com menor conteúdo de argila (21%), porém mais limoso, a compactação não afetou o comprimento, mas sim a distribuição das raízes, e estas não cresceram na camada compactada ($d \geq 1,50$ g cm⁻³).

Nos solos com 30 e 34% de argila, observou-se alto número e comprimento de raízes seminais adventícias, o que se refletiu no maior comprimento total de raízes, embora o comprimento de raiz seminal primária não seja máximo nestes solos. Ou seja, o número e comprimento das raízes seminais adventícias definiram o crescimento radicular, e este pode alcançar o máximo nestas texturas.

A água do solo não teve efeito no número e no comprimento radicular, embora outros autores considerem que a água é o fator que regula o crescimento e distribuição radicular (Kuchenbuch &

Barber, 1987; Barber et al., 1988). Veen & Boone (1990) notaram que tanto a taxa de crescimento das raízes primárias, como a das adventícias era afetado por potenciais de água no solo de -0,10 e -0,63 MPa, sendo as adventícias mais sensíveis. As diferenças em relação ao presente trabalho provavelmente se devem à utilização de diferentes híbridos.

Quando a densidade do solo é baixa, o efeito da textura do solo no crescimento radicular é magnificado. As texturas de 22 e 30% de argila causaram diminuição da ordem de 10% no comprimento total das raízes, mas quando os solos tinham 41 e 48% de argila, as reduções foram de 43 e 76% em relação ao maior valor, respectivamente (Fig. 3).

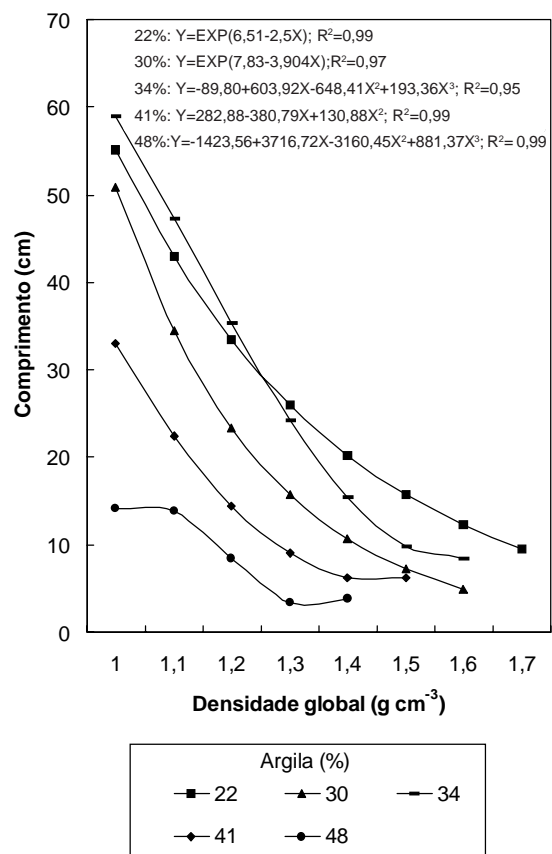


FIG. 3. Crescimento radicular total do milho em função da densidade aparente do solo e dos teores de argila.

Por outro lado, em densidades globais maiores do que $1,4 \text{ g cm}^{-3}$, as diferenças de crescimento das raízes em função da textura são bem menores.

Crescimento máximo

O crescimento máximo da raiz foi limitado pela resistência do solo à penetração, sendo expresso por uma função exponencial negativa desta última, tanto para o crescimento da raiz seminal primária (Fig. 4) como para as seminais (Fig. 5), respectivamente. Outros autores (Shierlaw & Alston, 1984; Veen & Boone, 1990) também observaram uma relação negativa entre a resistência e o crescimento. Veen & Boone (1990) observaram que o crescimento foi inibido quando a resistência do solo alcançou 4,2 MPa e o potencial água -1,7 MPa. No presente trabalho, em resistências da ordem de 1,5 MPa o crescimento das raízes principais já era quase que completamente inibido, mas as raízes seminais mos-

taram maior capacidade de penetração, tendo o crescimento sido completamente inibido em resistências do solo à penetração acima de 6,0 MPa. Entretanto, a resistência crítica que impede o crescimento radicular pode variar em função do teor de argila do solo (Gerard et al., 1982).

O crescimento radicular correlacionou-se de modo significativo ($P < 0,01$) e negativo ($r = -0,70$) com o volume de microporos do solo.

O $Q_{1/2}$ é o valor que define a resistência ao penetrômetro em que o crescimento é reduzido à metade do máximo (Dexter, 1987). O $Q_{1/2}$ determinado neste trabalho para as raízes primárias foi de 0,33 MPa, bem menor que 1,3 MPa, determinado para as raízes seminais adventícias. Esse último valor é igual ao 1,3 MPa determinado por Dexter (1987).

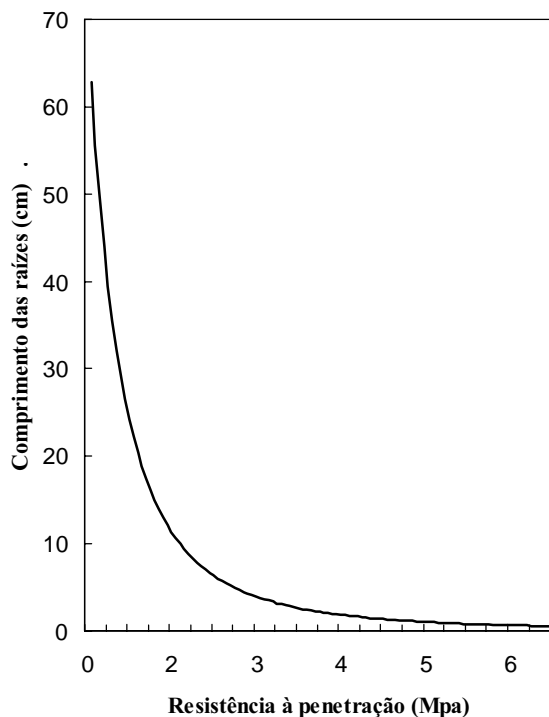


FIG. 4. Crescimento máximo da raiz seminal primária em função da resistência do solo ($Y = 62,89 * X^{-2,564}$).

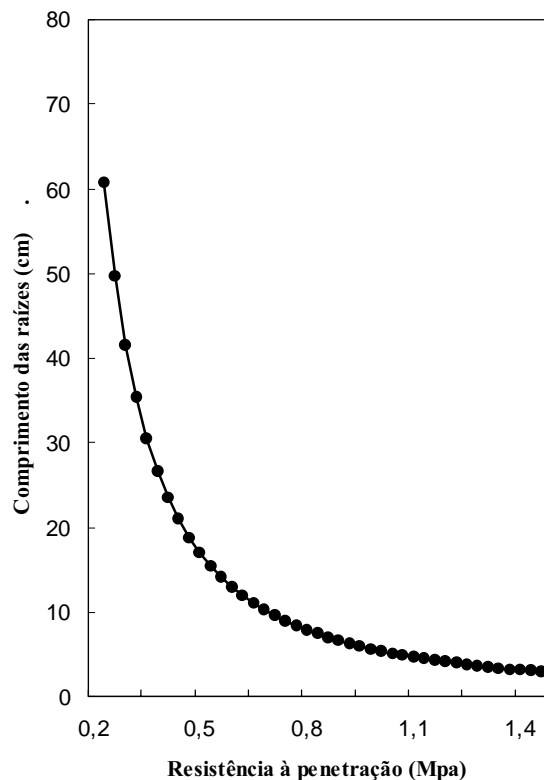


FIG. 5. Crescimento máximo das raízes seminais adventícias em função da resistência do solo ($Y = 5,445 * X^{-1,641}$).

CONCLUSÕES

1. Quanto mais argila no solo, maior a resistência à penetração no mesmo nível de densidade global.

2. Quando a densidade é baixa, o efeito relativo da textura é mais importante.

3. A secagem do solo causa maior aumento na resistência à penetração em solos com mais de 40% de argila.

4. Tanto o aumento no teor de argila como na densidade global causam diminuição no número de raízes seminais adventícias.

5. A raiz seminal primária é mais sensível ao aumento da resistência do solo do que as seminais adventícias.

6. Potenciais de água no solo variando de -0,03 a -0,64 MPa não influem no crescimento radicular.

7. À medida que o solo seca ou está mais compactado, a diferença de crescimento radicular em função da textura diminui.

8. A resistência à penetração de 1,3 MPa reduz o crescimento das raízes seminais adventícias do milho à metade.

REFERÊNCIAS

- BANDARA, B.W.; FRITTON, D.D. Directional response of corn roots to physical barriers. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.96, p.359-368, 1986.
- BARBER, S.A.; MACKAY, A.D.; KUCHENBUCH, R.O.; BARRACLOUGH, S. Effect of soil temperature and water on maize root growth. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.111, p.267-269, 1988.
- BOUYOUCOS, G.J. Studies on the dispersion procedure used in the hydrometer method for making mechanical analysis of soils. **Soil Science**, Baltimore, v.33, n.1, p.21-27, 1932.
- DEXTER, A.R. Mechanics of root growth. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.98, p.303-312, 1987.
- GERARD, C.I.; SEXTON, P.; SHAW, G. Physical factors influencing on soil strength and root growth. **Agronomy Journal**, Madison, v.74, p.875-879, 1982.
- GROENEVELT, P.H.; KAY, B.D.; GRANT, C.D. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. **Geoderma**, Amsterdam, v.34, p.101-114, 1984.
- KOOISTRA, M.J.; SCHOONDERBEEK, D.; BOONE, F.R.; VEEN, B.W.; NOORDWIJK, M. van. Root soil contact of maize as measured by a thin-section technique. II. Effects of soil compaction. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.138, p.119-129, 1992.
- KUCHENBUCH, R.D.; BARBER, S.A. Yearly variation of root distribution with depth in relation to nutrient uptake and corn yield. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.18, n.3, p.255-263, 1987.
- LOGSDON, S.D.; ALLMARAS, R.R.; NELSON, W.W.; WOORHEES, W.B. Persistence of subsoil compaction from heavy axle loads. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.23, p.95-100, 1992.
- MACKAY, A.D.; BARBER, S.A. Effect of soil moisture and phosphate level on root hair growth of corn roots. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.86, p.321-331, 1985.
- MARTIN, A.G.; JORDAN, T.N.; STEINHARDT, G.C. Influence of soil compaction on trifluralin phytotoxicity to corn. **Agronomy Journal**, Madison, v.77, p.481-483, 1985.
- MORAES, M.H. **Discriminação de horizontes e de unidades de solo e sua ordenação numa toposeqüência proveniente de rochas eruptivas básicas**. Piracicaba: USP-ESALQ, 1982. 152p. Tese de Doutorado.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. Métodos de análise de solo para fins de fertilidade. **Boletim Técnico do Instituto Agrônomo de Campinas**, n.81, p.1-31, 1983.
- 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.
- TARDIEU, F. Analysis of the spatial variability in maize root density. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.109, p.257-262, 1988.
- TAYLOR, H.M.; RATCLIFF, L.F. Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content. **Soil Science**, Baltimore, v.100, p.113-119, 1969.
- VEEN, B.W.; BOONE, F.R. The influence of mechanical resistance and soil water on the growth of seminal roots of maize. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.16, p.219-226, 1990.
- VOORHESS, W.B.; JOHNSON, J.F.; RANDALL, G.W.; NELSON, W.W. Corn growth and yield as affected by surface and subsoil compaction. **Agronomy Journal**, Madison, v.81, p.294-303, 1989.