

RESPOSTAS DE VARIEDADES DE SOJA À COMPACTAÇÃO DE CAMADAS DE SOLO^{1/}

Elias Nascentes Borges^{2/}
Roberto Ferreira de Novais^{3/}
Adair José Regazzi^{4/}
Bairon Fernandes^{3/}
Nairam Felix de Barros^{3/}

1. INTRODUÇÃO

Grande parte dos solos de cerrado apresenta condições físicas para o crescimento e desenvolvimento das plantas cultivadas: boa profundidade, boa porosidade e boa condutividade hidráulica. Essas características, aliadas à topografia quase plana, revelam um quadro favorável ao cultivo mecanizado dessas áreas. Constitui limitação inicial à sua utilização intensiva a baixa fertilidade (3). Entretanto, em decorrência do manejo inadequado, nota-se, com frequência, que algumas propriedades físicas do solo tendem a deteriorar-se. Durante o período de deterioração dessas propriedades, a compactação do solo tem sido a principal alteração observada.

A formação de camadas adensadas e, ou, compactadas, superficiais ou sub-superficiais, no perfil de alguns solos, principalmente nos de cerrado intensivamente cultivados, tem sido responsabilizada pela restrição ao aprofundamento radicular e pela erosão (8, 9, 10, 20).

^{1/} Parte da tese de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas.
Trabalho financiado pelos convênios IBDF/UFV/SIF e FINEP/UFV.

Aceito para publicação em 31-5-1988.

^{2/} Departamento de Agronomia do Instituto Superior de Ensino e Pesquisa de Ituiutaba. 38.300 Ituiutaba, MG.

^{3/} Departamento de Solos da U.F.V. 36570 Viçosa, MG. Bolsistas do CNPq.

^{4/} Departamento de Matemática da U.F.V. 36570 Viçosa, MG. Bolsista do CNPq.

Dados de pesquisas, como os de VEIHMAYER e HENDRICKSON (36), têm mostrado que a capacidade das raízes para penetrar camadas compactadas varia de um solo para outro e, mesmo, de uma planta para outra. Quase sempre, o valor da densidade-limite de solo situa-se em torno de $1,75 \text{ g/cm}^3$, para os arenosos, e $1,45 \text{ g/cm}^3$, para os argilosos. Trabalhando com milho e cevada em solos compactados, SHIERLAW e ALSTON (37) verificaram crescimento de raízes em solo com densidade de $1,55 \text{ g/cm}^3$, embora nem uma das raízes tivesse atravessado completamente essa camada adensada.

Redução no espaço aéreo do solo, abaixo do mínimo necessário para o crescimento das raízes, foi observada por CINTRA e MIELNICZUCK (9), quando a densidade aparente do solo foi superior a $1,39 \text{ g/cm}^3$. Isso ocasionou 50% de redução no comprimento das raízes, para as culturas de trigo, colza, cevada, tremoço e soja. Esses pesquisadores observaram que as culturas de trigo e soja responderam positivamente à compactação, até a densidade aparente de $1,04 \text{ g/cm}^3$, graças ao melhor arranjo das partículas, que melhorou a retenção da água e nutrientes. Entretanto, redução na velocidade de crescimento das raízes, quando a densidade aparente variou de $0,94$ a $1,30 \text{ g/cm}^3$, foi observada por PHILLIPS e KIRKCHAN (28).

O tipo de raiz da espécie vegetal também deve ser levado em consideração no processo de penetração em solos compactados. Raízes pivotantes de grande diâmetro são menos eficientes na penetração de solos com alta densidade aparente. CINTRA e MIELNICZUCK (9) observaram que raízes de colza e de tremoço penetraram pouco em solos com densidade de $1,30 \text{ g/cm}^3$, ao contrário da soja, que, por ter raízes pivotantes de grande diâmetro, não apresentou penetração nessa condição. Fato semelhante foi também observado por EDWARDS *et alii* (12), com milho, cujas raízes mais grossas só ocorriam entre os agregados, enquanto as raízes médias e finas eram encontradas dentro dos agregados. Em agregados com densidade aparente acima de $1,8 \text{ g/cm}^3$ não se verificou a presença de raízes.

A resistência do solo à penetração de raízes difere muito da resistência obtida com o penetrômetro. TAYLOR (35) observou que as raízes podem crescer através dos poros ou das linhas de fraqueza, que são pontos de menor resistência à penetração, enquanto o penetrômetro avalia a resistência média oferecida pelo solo.

Atualmente, observa-se certa preocupação em determinar qual é a situação mais prejudicial ao crescimento radicular de uma planta: um perfil uniformemente compactado ou compactação subsuperficial, entre 10 e 30 cm. BACCHI (1) mostrou que, quando a compactação ocorria subsuperficialmente (10–20 cm), o crescimento das raízes de cana-de-açúcar era mais prejudicado. Ele interpretou esse fato, observando que, quando o perfil é uniformemente compactado, a penetração de raízes tem início logo após a emergência, estágio em que as raízes se encontram ainda finas e com capacidade de penetrar apenas poros pequenos. No caso de uma compactação ser subsuperficial, as raízes, ao atingirem a camada compactada, já se encontram com diâmetro bem maior do que o dos poros dessa camada de solo.

Sabe-se, hoje, que a restrição ao crescimento radicular das plantas em solos compactados deve-se mais à impedância mecânica, embora outros fatores sejam importantes (9). Esse problema pode ser contornado pelo manejo adequado do solo e utilização de plantas melhoradas, com raízes com maior capacidade para penetrar camadas de solo compactadas.

Assim, este trabalho teve por objetivo avaliar variedades de soja, quanto à capacidade de suas raízes para penetrar camadas de solos compactadas, e estudar o «status» nutricional dessa planta nessas condições.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, com amostra de um Latossolo Vermelho-Escuro (LE) da região de Sete Lagoas, MG, coletada na camada de 0 a 20 cm. Essa amostra foi destorroadada, homogeneizada e passada em peneira de 2 mm, para posterior caracterização química e física (Quadro 1).

QUADRO 1 - Análises, química e física, da amostra de solo utilizada no ensaio (1)

pH (H_2O , 1:2,5)	4,6
P (ppm) (2)	2,0
K (ppm) (2)	56,0
Ca^{2+} (meq/100 g) (3)	0,7
Mg^{2+} (meq/100 g) (3)	0,0
Al^{3+} (meq/100 g) (3)	1,5
Areia grossa (%) (4)	7,0
Areia fina (%) (4)	12,0
Silte (%) (4)	9,0
Argila (%) (4)	72,0
Densidade real (g/cm^3) (5)	2,66
Capacidade de campo (%) (6)	42,7

(1) - Análises realizadas nos laboratórios do Departamento de Solos da UFV.

(2) - Extrator Mehlich-1 (4).

(3) - Extrator KCl 1N (11).

(4) - Método da pipeta (13).

(5) - Método do balão volumétrico (25).

(6) - Método da coluna transparente (14).

A amostra foi dividida em subamostras, de 40 kg cada uma, as quais receberam corretivo, constituído pela mistura de $CaCO_3$ e $MgCO_3$, na relação estequiométrica de 4:1, na dose, baseada em curva de incubação prévia, necessária para elevar o pH para 6,0. Seguiu-se um período de incubação aeróbica, com teor de umidade do solo equivalente à capacidade de campo, até a estabilização dos valores de pH. As subamostras de solo foram, então, novamente secadas ao ar, destorroadadas, homogeneizadas e passadas em peneiras de 4 mm.

Cada vaso, com capacidade de $1,18 dm^3$ de solo, foi constituído pela sobreposição de três anéis de PVC, de 5 cm de altura e 10 cm de diâmetro, unidos com fitas adesivas. Na parte superior dos vasos foi fixado um anel de 2,5 cm de altura e de diâmetro igual ao dos demais, o qual não recebeu solo, para irrigação adequada. O vaso assim formado foi fechado, no fundo, com tampa de isopor. Em todos os vasos, o primeiro (0-5 cm) e o terceiro anel (10-15 cm) receberam amostras deformadas de solo, com densidade aparente de $0,85 g/cm^3$, e adubadas (Quadro 2). O segundo anel (5-10 cm) recebeu diferentes quantidades de solo (0,33, 0,42, 0,45, 0,49 e 0,53 kg), corrigido e adubado semelhantemente ao dos outros dois anéis, de mo-

QUADRO 2 - Concentração e fontes dos nutrientes utilizados na adubação básica do solo

Nutrientes	Concentração	Fontes
	mg/dm ³	
P	280,3	KH ₂ PO ₄ NH ₄ H ₂ PO ₄
K	147,7	KH ₂ PO ₄
N	100	(NH ₄) ₂ SO ₄ NH ₄ H ₂ PO ₄
S	33,5	(NH ₄) ₂ SO ₄ CuSO ₄ · 5H ₂ O ZnSO ₄ · 7H ₂ O
Fe	1,55	FeCl ₃ · 6H ₂ O
Mn	3,66	MnCl ₂ · 4H ₂ O
Cu	1,39	CuSO ₄ · 5H ₂ O
Mo	0,20	NaMoO ₄ · 2H ₂ O
B	0,82	H ₃ BO ₃
Zn	3,99	ZnSO ₄ · 7H ₂ O

do que se obtivessem quatro diferentes valores de densidade aparente (0,85, 1,05, 1,15, 1,25 e 1,35 g/cm³).

Para a compactação do solo, feita somente no segundo anel de cada vaso e quantificada pela densidade aparente, determinou-se previamente a quantidade de solo necessária para se alcançarem os diferentes níveis de compactação. Em seguida, mediante a queda livre de um êmbolo de 4,60 kg de uma altura de 85 cm sobre um disco de ferro do mesmo diâmetro interno do anel, aplicou-se, através de golpes, no anel central, a força necessária para provocar a compactação uniforme do solo. O processo foi feito em subcamadas, de 1,67 cm cada uma, totalizando três subcamadas ao longo do anel, de 5 cm de altura. O aparelho compactador, em linhas gerais, foi igual ao descrito por BRUCE (6). A obtenção da compactação desejada foi facilitada pelo umedecimento do solo com 73% de sua capacidade de campo.

Os tratamentos foram constituídos pelo arranjo fatorial 5 x 5: cinco níveis de compactação do solo e cinco variedades de soja (*Glycine max* (L) Merrill): Bossier, Cristalina, Doko, IAC-8 e Tropical.

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, com quatro repetições.

Cada vaso recebeu cinco sementes de cada variedade. Dez dias após a emergência foi feito um desbaste, deixando-se duas plantas em cada vaso. Nessa oca-

sião, aplicou-se o nitrogênio em solução, em cobertura, na dose de 25 mg para cada quilo de solo, utilizando-se como fonte o NH_4NO_3 . Tomou-se, para efeito de cálculo, somente o peso do solo do anel superior. Outras adubações de N em cobertura foram feitas aos 20 e 30 dias após a emergência, em doses iguais à primeira. Durante o cultivo, o teor de umidade do solo foi mantido próximo à capacidade de campo. Quarenta dias após a emergência, procedeu-se ao corte da parte aérea das plantas, rente ao solo. Para avaliar a penetração de raízes na camada compactada, os três anéis que formavam o vaso foram separados e as raízes correspondentes ao solo de cada anel foram coletadas, descartando-se aquelas cuja penetração tivesse ocorrido entre a parede do anel e a camada de solo compactada. Em seguida, as raízes foram lavadas com água de torneira e, depois, com água destilada. O material vegetal (parte aérea e raízes), depois de seco em estufa de ventilação forçada, a 70°C, por 72 horas, foi moído e mineralizado, por meio de mistura nitro-perclórica, na relação de 0,5 g de material vegetal, 7 ml de ácido nítrico e 3 ml de ácido perclórico. Nos extratos obtidos, determinou-se o teor de fósforo total, colorimetricamente, pelo método da vitamina C, modificado por BRAGA e DEFELIPO (5); o teor de potássio total, por fotometria de chama; e os teores totais de cálcio e magnésio, por espectrofotometria de absorção atômica.

As amostras de solo dos anéis 1 e 2 foram analisadas quimicamente, obtendo-se os teores de fósforo e potássio disponíveis (Mehlich-1) e cálcio, magnésio e alumínio trocáveis (extrator de KCl-1N), bem como os valores de pH em água.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. *Crescimento da Parte Aérea*

A produção de matéria seca da parte aérea das cinco variedades de soja estudadas (Quadro 3) foi significativamente alterada pela aplicação de níveis crescentes de compactação na camada subsuperficial. O ajuste de equações de regressão e os respectivos pontos de máximo (Quadro 4), para as variedades IAC-8, Bossier e Cristalina, mostraram que essas variedades tiveram a produção de matéria seca aumentada por uma leve compactação do solo. Esse fato está relacionado com o aumento da disponibilidade de água e nutrientes próximo ao sistema radicular, causado pelo aumento no conteúdo volumétrico de água e de solo explorado pelas raízes. Ajuste linear e com declividade negativa, para as variedades Tropical e Doko (Quadro 4), enfatiza o efeito depressor da compactação do solo, em todos os níveis, a partir da condição natural, no rendimento da parte aérea dessas duas variedades.

O efeito da compactação no rendimento das culturas ainda não está muito claro. Há experimentos em que a compactação leva à redução e outros em que leva ao aumento do rendimento. ROSEMBERG (30) afirma que o rendimento das culturas em solos compactados depende da classe de solo, da atividade de argila, da umidade, das espécies e, mesmo, da variedade, como verificado neste trabalho (Quadro 3).

Considerando o crescimento relativo da parte aérea (Quadro 3), observa-se que a variedade Tropical apresentou maior sensibilidade ao efeito da compactação, com redução de aproximadamente 25% na produção de matéria seca, enquanto as variedades Cristalina e Bossier foram menos sensíveis, com redução de 16%. Essa sensibilidade diferencial, para redução do peso da matéria seca da parte aérea, reflete bem as diferenças entre as variedades, que compensam com crescimento aéreo a falta de crescimento do seu sistema radicular em profundidade,

QUADRO 3 - Produção de matéria seca da parte aérea e das raízes de cinco variedades de soja, submetidas à densidade de aparente de 0,85 g/cm³ nos anéis superior e inferior e a diferentes densidades no anel intermediário do vaso

Variedades	Densidade aparente (g/cm ³) (1)										
	Parte Aérea						Crescimento Relativo(%)				
	0,85	1,05	1,15	1,25	1,35	Média	0,85	1,05	1,15	1,25	1,35
	g/vaso										
IAC-8	8,77 a	8,40 a	8,41 a	7,45 a	7,22 a	8,05	100,0	95,8	95,8	84,9	82,3
Bossier	8,12 ab	8,17 ab	8,16 ab	7,26 a	6,96 ab	7,73	100,0	100,6	100,4	89,4	85,7
Tropical	8,28 ab	7,26 c	7,86 abc	6,22 b	6,26 c	7,18	100,0	87,7	94,9	75,1	75,6
Doko	8,38 ab	7,60 bc	7,40 c	6,83 ab	6,83 abc	7,41	100,0	90,7	88,3	81,5	81,5
Cristalina	7,92 b	7,66 bc	7,62 bc	7,06 a	6,54 bc	7,37	100,0	96,7	96,2	89,2	82,6
Média	8,29	7,82	7,89	6,96	6,76	-	100,0	94,3	95,2	84,0	81,5
	Raízes										
IAC-8	2,527	2,417	2,508	1,768	1,707	2,186 cd	100,0	95,6	99,2	70,0	67,6
Bossier	2,633	2,586	2,498	1,675	1,951	2,269 bc	100,0	98,2	94,9	63,6	74,1
Tropical	2,519	2,394	2,410	1,463	1,537	2,065 d	100,0	95,0	95,7	58,1	61,0
Doko	2,760	2,604	2,786	1,775	1,846	2,354 b	100,0	94,3	100,9	64,3	66,9
Cristalina	2,849	2,909	3,093	2,027	2,151	2,606 a	100,0	102,1	108,6	71,1	75,5
Média	2,658	2,582	2,659	1,742	1,838	-	100,0	97,1	100,0	65,5	69,1

(1) Densidade aparente do anel intermediário.

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

QUADRO 4 - Equações de regressão referentes à produção de matéria seca da parte aérea de cinco variedades de soja, em g/vaso (y), conforme a densidade³ aparente do anel intermediário do vaso (x), em g/cm³

Variedades	Equações	R ²	Ponto de máximo
IAC-8	$\hat{y} = 4,61 + 10,04^{**}x - 6,06^{*}x^2$	0,91	0,87
Bossier	$\hat{y} = -0,84 + 18,80^{**}x - 9,70^{**}x^2$	0,91	0,97
Tropical	$\hat{y} = 11,89 - 4,18^{**}x$	0,75	-
Doko	$\hat{y} = 11,09 - 3,26^{**}x$	0,96	-
Cristalina	$\hat{y} = 2,47 + 12,15^{**}x - 6,76^{*}x^2$	0,98	0,91

*, ** - Significativo, a 5 e 1% de probabilidade, pelo teste t.

em virtude de maior produção de raízes na camada superficial (Quadros 5 e 6), desde que a água e os nutrientes estejam adequadamente supridos nessa camada.

À medida que aumentou a compactação do solo, houve aumento progressivo de sintomas visuais, caracterizados por clorose e, em alguns casos, necrose das folhas basais. Esses sintomas podem ser consequência da redução na disponibilidade de nutrientes, ou, mesmo, de um desbalanceamento destes, observado na camada superficial do vaso, região a que o sistema radicular das plantas ficou restrito, para os maiores níveis de compactação. Contudo, ROSEMBERG e WILLITS (31) verificaram que clorose e necrose, semelhantes às referidas, permaneciam em plantas de feijão e cevada bem supridas, mas submetidas a solos com alta densidade. Esses pesquisadores concluíram que essas alterações eram causadas pela compactação.

Outra alteração fisiológica observada durante a condução do experimento foi uma floração prematura das plantas de soja nos níveis mais altos de compactação. No entanto, trabalhos mostram que as evidências desse aspecto são contraditórias. HEATH (18), por exemplo, observou que a produção inicial do algodão antecipou-se. Observação semelhante foi feita por ROSEMBERG e WILLITS (31), que verificaram evolução positiva e linear na maturação fisiológica, com níveis crescentes de compactação, na cultura de feijão. Entretanto, Phillips, citado por ROSEMBERG e WILLITS (31), observou retardamento no pendramento e espigamento do milho cultivado em solos compactados.

3.2. Crescimento de Raízes

O impedimento subsuperficial levou a soja a acumular mais raízes na camada superficial do vaso, onde as condições físicas apresentavam-se mais adequadas (Quadros 5 e 6). Maior acúmulo de raízes nessa camada foi também observado por BACCHI (1), SHIERLAW e ALSTON (23) e COSTA *et alii* (10), em trabalhos semelhantes a este, e por NEVES (26) e SILVA *et alii* (34), quando o impedimento foi de natureza química e ocasionado por alta saturação de alumínio na camada subsuperficial.

O crescimento de raízes na camada superficial do solo tornou-se bem maior a partir da densidade de 1,25 g/cm³ na subsuperfície, coincidindo, nesse caso, com a

QUADRO 5 - Peso da matéria seca das raízes, por anel, de cinco variedades de soja, submetidas à densidade aparente de 0,85 g/cm³ nos anéis superior e inferior, e a diferentes densidades no anel intermediário do vaso

Anéis (2) Variedades	Densidade aparente (g/cm ³) (1)					Média	
	0,85	1,05	1,15	1,25	1,35		
g							
1	IAC-8	1,202 a	1,105 b	1,245 b	1,753 ab	1,707 cd	1,402
	Bossier	1,249 a	1,184 ab	1,216 b	1,664 bc	1,952 ab	1,453
	Tropical	1,115 a	1,136 b	1,183 b	1,463 c	1,537 d	1,287
	Doko	1,261 a	1,171 ab	1,302 ab	1,763 ab	1,846 bc	1,469
	Cristalina	1,287 a	1,397 a	1,473 a	1,952 a	2,151 a	1,652
	Média	1,223	1,198	1,284	1,719	1,838	-
2	IAC-8	0,638	0,606	0,533	0,015	0,000 (3)	0,448 b
	Bossier	0,667	0,678	0,606	0,009	0,000	0,490 ab
	Tropical	0,679	0,559	0,475	0,000	0,000	0,428 b
	Doko	0,704	0,687	0,666	0,013	0,000	0,518 a
	Cristalina	0,684	0,716	0,710	0,075	0,000	0,546 a
	Média	0,674	0,649	0,598	0,022	0,000	-
3	IAC-8	0,687	0,705	0,730	0,000 (3)	0,000 (3)	0,707 c
	Bossier	0,717	0,724	0,677	0,000	0,000	0,706 c
	Tropical	0,725	0,700	0,751	0,000	0,000	0,725 bc
	Doko	0,795	0,722	0,818	0,000	0,000	0,778 b
	Cristalina	0,876	0,847	0,910	0,000	0,000	0,878 a
	Média	0,760	0,740	0,777	0,000	0,000	-

(1) Densidade aparente do anel intermediário.

(2) Vaso formado pela sobreposição de três anéis.

(3) Valores não incluídos na análise estatística.

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

QUADRO 6 - Distribuição percentual de raízes, por anel, de cinco variedades de soja, submetidas à densidade aparente de 0,85 g/cm³ nos anéis superior e inferior e a diferentes densidades no anel intermediário do vaso

Variedades	Anéis ⁽²⁾	Densidade aparente (g/cm ³) ⁽¹⁾				
		0,85	1,05	1,15	1,25	1,35
IAC-8	1	47,6	45,7	49,6	99,1	100,0
	2	25,2	25,1	21,3	0,9	0,0
	3	27,2	29,2	29,1	0,0	0,0
Bossier	1	47,4	45,8	48,6	99,4	100,0
	2	25,3	26,2	24,3	0,6	0,0
	3	27,3	28,0	27,1	0,0	0,0
Tropical	1	44,3	47,4	49,1	99,2	100,0
	2	27,0	24,4	19,7	0,8	0,0
	3	28,7	28,0	31,2	0,0	0,0
Doko	1	45,7	45,9	45,7	99,3	100,0
	2	25,5	26,4	23,9	0,7	0,0
	3	28,8	27,7	29,4	0,0	0,0
Cristalina	1	45,2	46,3	47,6	96,5	100,0
	2	24,0	24,6	23,0	3,5	0,0
	3	30,8	24,8	29,4	0,0	0,0

(1) - Densidade aparente do anel intermediário.

(2) - Vaso formado pela sobreposição de três anéis.

densidade em que não mais se observou penetração de raízes na camada compactada (Quadro 5). Esse fato caracteriza a soja como cultura com boa capacidade de concentrar o sistema radicular somente num pequeno volume de solo, caso este apresente condições físicas e químicas adequadas para tal, sem trazer, contudo, drásticas reduções à produção da parte aérea da planta (Quadro 3).

Embora todas as variedades estudadas seguissem a mesma tendência de acúmulo de raízes na camada superficial, observou-se diferença estatística entre algumas delas (Quadro 5). As variedades Cristalina e Doko, a exemplo do que aconteceu com a produção da parte aérea, de modo geral, não diferiram entre si, quanto a crescimento e produção de raízes nessa camada superficial, até a densidade de 1,35 g/cm³, e foram significativamente superiores às demais variedades testadas.

Quanto à produção de raízes na camada compactada, a não-significância da interação de variedade e densidade permitiu que se comparassem as médias das variedades, independentemente dos valores de densidade (Quadro 5). Embora não houvesse diferença significativa entre as variedades Cristalina, Doko e Bossier, notou-se leve superioridade da primeira, em relação às demais, no crescimento de

raízes na camada compactada. Enquanto as outras variedades apresentavam redução na penetração de raízes a partir da densidade de $0,85 \text{ g/cm}^3$, a variedade Cristalina só apresentou essa tendência a partir da densidade de $1,15 \text{ g/cm}^3$ (Quadro 5).

Considerando o resultado médio de todas as variedades, observa-se uma redução na capacidade de penetração de raízes à medida que se compacta o solo, até a densidade de $1,15 \text{ g/cm}^3$. A partir dessa densidade, não se observa penetração de raízes satisfatória, com valor zero para a densidade de $1,35 \text{ g/cm}^3$, ficando, nesse caso, todo o crescimento radicular restrito à camada superficial do solo (Quadros 5 e 6).

São várias as modificações ocasionadas pelo processo de compactação que podem influenciar a penetração de raízes no solo. Além da resistência mecânica, uma possível deficiência de oxigênio e a formação de ambiente redutor são fatores importantes. Além da pequena produção, para a densidade $\geq 1,25 \text{ g/cm}^3$ (Quadro 6), as raízes se concentraram apenas nos primeiros centímetros da camada compactada, apresentando, ainda, sinais evidentes de alterações morfológicas, sendo curtas, grossas e escamosas. Segundo BALIGAR *et alii* (2), essas alterações morfológicas são características de raízes desenvolvidas em ambiente redutor, pobre em oxigênio. GRABLE e SIEMER (17), RUSSEL e RUSSEL (32) e GAVANDE (15) também acreditam serem a baixa difusão de oxigênio e o conseqüente acúmulo de CO_2 as causas dessa redução ou, mesmo, da restrição à elongação radicular em solos compactados. Contudo, BUNT (7), PHILLIPS e KIRKMAN (29) e ROSEMBERG e WILLITS (31) afirmam que a importância da aeração está mais relacionada com solos argilosos, não havendo, normalmente, efeito da aeração em solos de textura média ou grosseira, mesmo em altas densidades. MIRREH e KETCHESON (24) e BAVER (3), porém, consideram que o baixo crescimento radicular em solos compactados é conseqüência da baixa disponibilidade de água, embora o conteúdo volumétrico seja aumentado pela compactação. A limitada quantidade de nutrientes que chega às raízes, dada a baixa disponibilidade de água no solo, é que, segundo ZIMMERMAN e KARDOS (39), restringe o crescimento radicular em solos compactados. Entretanto, para VEIHMEYER e HENDRICKSON (36), a redução na porosidade e a diminuição no tamanho dos poros, com o aumento da densidade aparente, são as causas do menor crescimento radicular. Contudo, WIERSUM (38) afirma que o tamanho só terá influência na penetração de raízes se o poro se apresentar rígido, ou seja, se não apresentar capacidade de dilatação para a penetração de raízes. Se se considerar que a restrição ao aprofundamento de raízes nessas camadas compactadas deve-se mais à impedância do que aos outros fatores, pode-se concluir que a pressão exercida pelas raízes não foi suficiente para vencer a resistência da camada compactada. Nesse sentido, GILL e BOLT (16) observaram que o crescimento de raízes em solos compactados é condicionado pelo balanço entre as pressões externas (oferecida pelo solo) e internas (exercida pelas raízes). O que interessa, entretanto, não é a pressão máxima que as raízes podem exercer, mas, sim, a pressão mínima oferecida pelo solo, a qual reduzirá a elongação de raízes.

Considerando a média de peso de matéria seca, para os diferentes níveis de densidade (Quadro 5), pode-se observar superioridade da variedade Cristalina, sobre as demais, na produção de maiores quantidades de raízes em maiores profundidades. Esse fato é de importância, considerando que essa variedade, possivelmente, pode suportar melhor os veranicos do que as demais variedades estudadas.

Tomando o somatório das raízes das três camadas do vaso e transformando-o

em crescimento relativo (Quadro 3), pode-se observar uma sensível redução na produção total de raízes a partir da densidade de $1,25 \text{ g/cm}^3$. Esses resultados, no entanto, diferem dos encontrados por SHIERLAW e ALSTON (33).

3.3. Nutrientes na Parte Aérea das Plantas

Todas as variedades de soja apresentaram concentrações semelhantes de fósforo, potássio, cálcio e magnésio na parte aérea (Quadro 7).

Considerando os pontos de máximo das equações de regressão referentes às concentrações de P, K e Mg na parte aérea da soja (Quadro 8), pode-se observar que, à semelhança do que aconteceu com a produção da parte aérea, uma leve compactação inicial causou maiores concentrações desses nutrientes na planta. Esse fato, possivelmente, resultou como anteriormente mencionado, do aumento dos volumes de solo e de água explorados pelas raízes, bem como de um contato mais íntimo entre o solo, a solução e as raízes. Como as raízes ocupam apenas uma pequena fração do volume total do solo, o aumento volumétrico relativo da água e da densidade do solo faz com que o nutriente atinja mais rapidamente os pontos de absorção. Para que atinjam os sítios de absorção das raízes, os nutrientes devem movimentar-se pela água que segue o fluxo transpiracional da planta (fluxo de massa) ou pela difusão proporcionada pelo gradiente de concentração estabelecido entre a concentração próxima às raízes e a concentração na solução do solo mais distante, na medida da exaustão do nutriente nas raízes. Ambos os processos são dependentes do tipo e do estado de estrutura do solo. Por isso, não é fácil determinar exatamente a influência da compactação nesses mecanismos de transportes de íons. Há experimentos que mostram que o transporte é aumentado e outros que indicam que é diminuído pela compactação. PHILLIPS e BROWN (27) e HIRA e SINGH (19), investigando as causas do aumento na absorção de íons pelas plantas, em razão de pequenos aumentos na compactação, verificaram que, além do aumento no conteúdo da água, havia também uma redução na tortuosidade, facilitando tanto o processo de difusão quanto o processo de fluxo de massa. Entretanto, WARNCKE e BARBER (37) verificaram que a absorção diminuiu, para níveis elevados de compactação do solo, embora o fator de impedância continuasse aumentando. Eles atribuíram essa redução a uma maior interação do íon com o solo. Referência nesse sentido foi também feita por KEMPER *et alii* (21), que verificaram que a força de retenção de íons entre as partículas de argila aproximadas pela compactação era mais intensa. LEONARD e JOHN (22), tentando justificar a redução na absorção de alguns íons em solos com altas densidades, verificaram estreita relação entre aeração próxima às raízes e absorção de nutrientes. Em todo caso, a influência da pequena aeração, para os níveis mais elevados de compactação, não deve ser descartada nesse processo de concentração de nutrientes na parte aérea da planta.

4. RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a capacidade de crescimento de raízes de variedades de soja (Bossier, Cristalina, Doko, IAC-b e Tropical) em camadas de solo compactadas, em casa de vegetação, e o efeito dessa compactação sobre a concentração de nutrientes na parte aérea das plantas. Utilizaram-se vasos constituídos pela sobreposição de três anéis de PVC, de 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura, unidos por fita adesiva e fechados, no fundo, por uma placa de isopor. Amostra de um Latossolo Vermelho-Escuro foi homogeneizada e passada em peneira de

QUADRO 7 - Concentração de fósforo, potássio, cálcio e magnésio na parte aérea de cinco variedades de soja, submetidas à densidade aparente de 0,85 g/cm³ nos anéis superior e inferior e a diferentes densidades no anel intermediário do vaso

Nutriente	Densidade aparente (1)	Variedades				Média
		IAC-8	Bossier	Tropical	Doko	Cristalina
	g/cm ³					
Fósforo	0,85	0,13	0,14	0,14	0,13	0,14
	1,05	0,14	0,14	0,13	0,13	0,14
	1,15	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13
	1,25	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12
	1,35	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12
	Média (2)	0,13 a	0,13 a	0,13 a	0,13 a	0,13 a
Potássio	0,85	1,68	1,76	1,82	1,94	1,62
	1,05	1,82	1,84	1,93	1,99	1,86
	1,15	1,91	1,88	1,92	1,86	1,77
	1,25	1,40	1,54	1,42	1,39	1,31
	1,35	1,08	1,26	1,19	1,11	1,05
	Média (2)	1,58 ab	1,66 a	1,66 a	1,66 a	1,43 b
Cálcio	0,85	0,95	1,18	1,07	1,13	1,08
	1,05	0,87	1,08	1,06	1,15	1,06
	1,15	0,98	1,00	1,05	1,09	1,03
	1,25	0,84	1,00	1,04	1,07	0,99
	1,35	0,91	0,91	0,92	1,05	0,93
	Média (2)	0,91 b	1,03 a	1,03 a	1,10 a	1,03 a
Magnésio	0,85	0,42	0,41	0,41	0,40	0,41
	1,05	0,42	0,45	0,42	0,43	0,43
	1,15	0,42	0,42	0,41	0,39	0,45
	1,25	0,40	0,45	0,42	0,40	0,40
	1,35	0,40	0,40	0,37	0,40	0,44
	Média (2)	0,41 a	0,43 a	0,41 a	0,40 a	0,42 a

(1) - Densidade aparente do anel intermediário.

(2) - Médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

QUADRO 8 - Equações de regressão referentes às concentrações de P, K, Ca e Mg na parte aérea da soja, em percentagem (y), conforme a densidade aparente da camada intermediária do vaso (x), em g/cm³

Nutrientes	Equações	r ²	Ponto de máximo (g/cm ³)
Fósforo	$\hat{y} = 0,045 + 0,199^{**}x - 0,107x^2$	0,90	0,93
Potássio	$\hat{y} = -4,104 + 12,098^{**}x - 6,103^{**}x^2$	0,98	0,99
Cálcio	$\hat{y} = 1,320 - 0,265^{**}x$	0,90	-
Magnésio	$\hat{y} = 0,020 + 0,788^{**}x - 0,383^{**}x^2$	0,93	1,00

*, ** - Significativo, a 5 e 1% de probabilidade, pelo teste t.

4 mm, recebendo, então, calagem e adubação adequadas ao crescimento das plantas. A compactação, efetuada somente no solo do anel central, foi feita do modo que se obtivessem as densidades aparentes de 0,85, 1,05, 1,15, 1,25 e 1,35 g/cm³. Quanto ao crescimento da parte aérea, a variedade Tropical mostrou ser a mais sensível ao aumento da densidade de solo da camada. Na densidade de 1,25 g/cm³ houve, ainda, crescimento de raízes, o que não aconteceu na maior densidade testada, para todas as variedades. As concentrações de fósforo, potássio e magnésio na parte aérea das plantas aumentaram, com a compactação, até a densidade de, aproximadamente, 1,0 g/cm³, caindo daí por diante. Todavia, a concentração de cálcio caiu linearmente com o aumento da compactação do solo. De modo geral, todas as variedades apresentaram reação semelhante aos tratamentos testados.

5. SUMMARY

(GROWTH OF SOYBEAN VARIETIES IN RESPONSE TO SOIL COMPACTED LAYERS)

This study was conducted to evaluate the capacity of roots of soybean varieties (Bossier, Cristalina, Doko, IAC-8 and Tropical) to grow into soil compacted layers and the effect of soil compaction on plant growth and nutrient concentrations. Containers were made up by superimposing three PVC rings. Each ring was 5 cm high, with a diameter of 10 cm. The rings were bound together with adhesive tape and the bottom of the container was closed with a piece of styrofoam. Lime and fertilizer, in proper quantities, were mixed with a sample of a Dark Red Latosol. Pressure was applied to the soil corresponding to the intermediate ring of the container in order to obtain the following bulk densities: 0.85, 1.05, 1.15, 1.25, and 1.35 g/cm³. Soil bulk density in the upper and lower rings was 0.85 g/cm³.

The growth of the aerial part of the Tropical variety showed most sensitivity to the increase of the soil compaction. In the 1.25 g/cm³ density, root growth still occurred, in the case of all varieties, but this did not happen in the highest density tested, for any variety.

Phosphorus, potassium and magnesium concentrations in plant shoots in-

creased with the compaction up to nearly 1.0 g/cm³, decreasing for higher densities. However, calcium concentration decreased linearly with the increase in the soil compaction. In general, the behavior of all varieties was similar in response to the treatments tested.

6. LITERATURA CITADA

1. BACCHI, O.O.S. *Efeito da compactação sobre o sistema solo-planta em cultura de cana-de-açúcar (Saccharum spp.)*. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura «Luiz de Queiroz», 1976. 65 p. (Tese M.S.).
2. BALIGAR, V.C.; NASH, V.E.; HARE, M.L. & PRICE Jr, J.A. Soybean root anatomy as influenced by soil bulk density. *Agron. J.*, 67:842-844, 1975.
3. BAVER, L.D. Soil permeability in relation to non-capillary porosity. *Soil Sci. Amer. Proc.*, 3:52-56, 1938.
4. BRAGA, J.M. *Avaliação da fertilidade do solo*. (Parte I). Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1980. 87 p.
5. BRAGA, J.M. & DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extrato de solo e material vegetal. *Rev. Ceres*, 21:73-85, 1974.
6. BRUCE, R.R. An instrument for the determination of soil compactibility. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 19:253-257, 1955.
7. BUNT, A.C. Some physical properties of part-plant composts and their effects on plant growth. *Plant and Soil*, 13:322-332, 1961.
8. CASSEL, D.K. Effects of plowing depth and deep incorporation of lime and phosphorus upon physical and chemical properties of two Coastal Plain soil after 15 years. *Soil Sci. Am. Proc.*, 42:116-120, 1980.
9. CINTRA, F.L.D. & MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. *R. Bras. Ci. Solo*, 7:323-327, 1983.
10. COSTA, L.M.; SEDIYAMA, T.; SEDIYAMA, C.S.; NOVAIS, R.F.; BRUNELI Jr., H.C. & FOGLI, M.G.R. Estudo do sistema radicular de cinco variedades de soja em solos com camadas compactadas, na Fazenda Itamarati. In: ENCONTRO TÉCNICO SOBRE A CULTURA DA SOJA, Ponta Porã, 1984. Anais, Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1984. p. 113-114.
11. DEFELIPO, B.V. & RIBEIRO, A.C. *Análise química do solo (metodologia)*. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1981. 17 p. (Boletim de Extensão, 29).
12. EDWARDS, W.M.; FEHRENBACHER, J.B. & VARVA, J.P. The effect of discret pod density on corn root penetration in planasol. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 28:560-564, 1964.
13. EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. *Ma-*

nual de Métodos de Análise de Solo. Rio de Janeiro, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1979. s.n.p.

14. FERNANDES, B. & SYKES, I.O. Capacidade de campo e redução de água em três solos de Minas Gerais. *Rev. Ceres*, 15:1-39, 1968.
15. GAVANDE, S.A. *Física de suelos*. México, Centro Regional de Ayuda Técnica, 1972. 315 p.
16. GILL, W.R. & BOLT, G.H. Pfeffer's studies of root growth pressure exerted by plants. *Agron. J.*, 47:166-168, 1955.
17. GRABLE, A.R. & SIEMER, E.F. Effects of bulk density, aggregate size and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials, and elongation of corn roots. *Soil. Sci. Am. Proc.* 32:180-186, 1968.
18. HEATH, O.V.S. A study in soil cultivation. *J. Agr. Sci.* 27:511-540, 1937.
19. HIRA, G.S. & SINGH, N.T. Observed and predicted rates of phosphorus diffusion in soils of varying bulk density and water content, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41:537-540, 1977.
20. KEMPER, B. & DERPSCH, R. Soil compaction and root growth in Paraná. In: RUSSEL, R.S. (ed.). *The soil/root system in relation to Brazilian Agriculture*. Londrina, Fundação Instituto Agrônômico do Paraná, 1981. p.81-101.
21. KEMPER, W.D.; STEWART, B.A. & PORTER, L.K. Effects of compaction on soil nutrient status. In: BARNES, K.K. (ed.). *Compaction of agricultural soils*. Michigan, ASAE, 1971. p. 178-89.
22. LEONARD, P.P. & JOHN, W.S. The importance of oxygen in the nutrient substrate for plants-ion absorption. *Soil Sci.*, 57:143-154, 1944.
23. LOPES, A.S. *Solos sob «cerrados». Características, propriedades e manejo*. Piracicaba, Instituto da Potassa & Fósforo, Instituto Internacional da Potassa, 1983. 162p.
24. MIRREH, H.F. & KETCHESON, J.W. Influence of soil water matric potential and resistance to penetration on corn root elongation. *Can. J. Soil. Sci.*, 53: 383-388, 1973.
25. MOURA FILHO, W. *Métodos de campo e laboratório*. Viçosa, UREMG, 1964. 24p.
26. NEVES, J.C.L. *Aspectos nutricionais em mudas de Eucalyptus spp. Tolerância ao alumínio e níveis críticos de fósforo no solo*. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1983. 87p. (Tese M.S.).
27. PHILLIPS, R.E. & BROWN, D.A. Ion diffusion. III. The effect of soil compaction on self-diffusion of ^{86}Rb and ^{89}Sr . *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 29:657-661, 1965.

28. PHILLIPS, R.E. & KIRKHAN, A. Mechanical impedance and corn seedlings root growth. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 26:319-322, 1962.
29. PHILLIPS, R. & KIRKHAN, A. Soil compaction in the field and corn growth. *Agron. J.*, 54:29-34, 1962.
30. ROSEMBERG, N.J. Response of plants to physical effects of soil compaction. *Adv. Agron.*, 16:181-196, 1964.
31. ROSEMBERG, N.J. & WILLITS, N.A. Yield and physiological response of barley and beans grown in artificially compacted soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 26:78-82, 1962.
32. RUSSEL, E.J. & RUSSEL, E.W. *Las condiciones de suelos y el desarrollo de las plantas*. Madrid, Aguilar, 1964. 771 p.
33. SHIERLAW, J. & ALSTON, A.M. Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. *Plant and Soil*, 77:15-26, 1984.
34. SILVA, J.B.C.; NOVAIS, R.F. & SEDIYAMA, C.S. Identificação de genótipos de sorgo tolerantes à toxidez de alumínio. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 8:77-78, 1984.
35. TAYLOR, H.M. Root behavior as affected by soil structure and strenght. In: CARSON, E.W. (ed.). *The plant root and its environment*. Charlottesville, University of Virginia, 1971. p. 271-291.
36. VEIHMEYER, F.J. & HENDRICKSON, S.S. Soil density and root penetration. *Soil Sci.*, 65:487-493, 1948.
37. WARNCKE, D.D. & BARBER, S.A. The influence of soil bulk density and its interactions with moisture. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 36:42, 1972.
38. WIERSUM, L.K. The relationship of the size and structural rigidity of pores to their penetration by roots. *Plant and Soil*, 9:75-84, 1957.
39. ZIMMERMANN, R.P. & KARDOS, L.T. Effects of bulk density on root growth. *Soil Sci.*, 91:280-288, 1961.