



UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

**RESPOSTA DA SOJA E DO EUCALIPTO A  
FÓSFORO EM SOLOS DE DIFERENTES  
TEXTURAS, NÍVEIS DE DENSIDADE  
E DE UMIDADE**

**MARCO AURÉLIO VITORINO RIBEIRO**

1999

1950

1950  
1951  
1952  
1953  
1954  
1955  
1956  
1957  
1958  
1959  
1960

48695

MFN34271

**MARCO AURÉLIO VITORINO RIBEIRO**

**RESPOSTA DA SOJA E DO EUCALIPTO A FÓSFORO EM SOLOS DE  
DIFERENTES TEXTURAS, NÍVEIS DE DENSIDADE E DE UMIDADE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Curso de Pós-graduação em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de "Doutor".

Orientador

Prof. PhD. Roberto Ferreira de Novais

LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRASIL  
1999

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca Central da UFLA**

Ribeiro, Marco Aurélio Vitorino

Resposta da soja e do eucalipto a fósforo em solos de diferentes texturas, níveis de densidade e de umidade / Marco Aurélio Vitorino Ribeiro. -- Lavras : UFLA, 1999.

71 p. : il.

Orientador: Roberto Ferreira de Novais.

Tese (Doutorado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Fósforo. 2. Compactação. 3. Solo. 4. Soja. 5. Eucalipto. 6. Umidade I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-631.58

-631.45

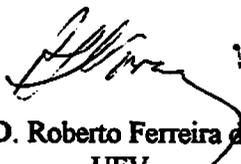
**MARCO AURÉLIO VITORINO RIBEIRO**

**RESPOSTA DA SOJA E DO EUCALIPTO A FÓSFORO EM SOLOS DE  
DIFERENTES TEXTURAS, NÍVEIS DE DENSIDADE E DE UMIDADE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Curso de Pós-graduação em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de "Doutor".

APROVADA em 26 de novembro de 1999.

Prof. Dr. Antonio Eduardo Furtini Neto	UFLA
Prof. PhD. José Maria de Lima	UFLA
Prof. Dr. Mozart Martins Ferreira	UFLA
Prof. Dr. Valdemar Faquin	UFLA



Prof. PhD. Roberto Ferreira de Novais  
UFV  
(Orientador)

LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRASIL

A Deus, por sempre estar presente  
e por ter me dado forças,

***DEDICO***

Aos meus pais, José e Aparecida, pelo exemplo de vida e  
especialmente à minha esposa Marisa e meus filhos Leandro e  
Luciana, pelo amor, carinho, companheirismo e paciência,

***OFEREÇO***

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciência do Solo, pela oportunidade concedida para a realização do Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas.

À Universidade Federal de Viçosa e ao seu Departamento de Solos, pela oportunidade de realização de parte dos créditos e da fase experimental da Tese.

Ao Professor Roberto Ferreira de Novais (DPS-UFV) pela orientação segura, consistente, apoio, amizade e ensinamentos transmitidos durante o curso.

Aos Professores Antonio Eduardo Furtini Neto, José Maria de Lima, Mozart Martins Ferreira e Valdemar Faquin pelas valiosas sugestões apresentadas.

Aos Professores Liovando Marciano da Costa, Nairam Félix de Barros e Júlio César Lima Neves, todos do DPS-UFV, pelas valiosas sugestões apresentadas na elaboração e condução do Projeto de Tese.

A todos os colegas de curso, especialmente a Luiz Arnaldo Fernandes, Ruy Carvalho e Enilson de Barros Silva, pela amizade, agradável convívio e proveitosas discussões.

Aos Professores e funcionários do Departamento de Ciência do Solo da UFLA e do Departamento de Solos da UFV, e a todos que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	iii
CAPÍTULO 1.....	1
1 Introdução geral.....	1
2 Referencial Teórico.....	2
3 Referências Bibliográficas.....	19
CAPÍTULO 2: Níveis de densidade e fósforo no crescimento da soja e do eucalipto.....	29
Resumo.....	29
Abstract.....	30
1 Introdução.....	31
3 Material e métodos.....	32
4 Resultados e discussão.....	36
5 Conclusões.....	52
6 Referências bibliográficas.....	52
CAPÍTULO 3: Níveis de densidade, de umidade e fósforo no crescimento da soja e do eucalipto.....	55
Resumo.....	55
Abstract.....	56
1 Introdução.....	57
3 Material e métodos.....	58
4 Resultados e discussão.....	62
5 Conclusões.....	69
6 Referências bibliográficas.....	70

## RESUMO

RIBEIRO, Marco Aurélio Vitorino. Resposta da soja e do eucalipto a fósforo em solos de diferentes texturas, níveis de densidade e de umidade. Lavras: UFLA, 1999. 71p. (Tese – Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)\*

Com o objetivo de avaliar os efeitos da densidade do solo, doses de fósforo e umidade no crescimento da soja e do eucalipto, foram conduzidos experimentos com dois latossolos de diferentes texturas, em casa-de-vegetação do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa. No primeiro experimento foram utilizados os níveis de densidade de 0,90 (densidade natural), 1,10 e 1,30 g cm<sup>-3</sup> e doses de fósforo de 0, 100, 200, 400 e 800 mg dm<sup>-3</sup> em um Latossolo Vermelho-Escuro (LE) muito argiloso e os níveis de densidade de 1,30 (densidade natural), 1,50 e 1,70 g cm<sup>-3</sup> e doses de fósforo de 0, 75, 150, 300 e 600 mg dm<sup>-3</sup> em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LV) franco arenoso, acondicionados em vasos plásticos de 1,6 dm<sup>3</sup>. No segundo experimento, utilizou-se a técnica de raízes subdivididas em vasos geminados de 2,4 dm<sup>3</sup> cada, em que um dos compartimentos continha os tratamentos que foram dois latossolos (os mesmos do primeiro experimento), dois níveis de densidade (0,90 e 1,20 g cm<sup>-3</sup> no LE e 1,30 e 1,70 g cm<sup>-3</sup> no LV), uma dose única de fósforo (400 mg dm<sup>-3</sup> no LE e 300 mg dm<sup>-3</sup> no LV) e quatro níveis de umidade dos solos aplicados no final da fase experimental, em função dos tempos de coleta de dados. O outro compartimento do vaso continha solução nutritiva sem fósforo, comum a todos os tratamentos. Concluiu-se que: o aumento da densidade do solo influenciou negativamente o crescimento de ambas as espécies; a resposta das plantas às doses de fósforo foi menor com o aumento da densidade do solo; o aumento da densidade do solo foi mais prejudicial ao crescimento das plantas no LE do que no LV; o eucalipto foi mais eficiente na recuperação do fósforo aplicado aos solos do que a soja; com o aumento da densidade dos solos, houve uma redução no volume de exsudato xilemático das plantas e a concentração de fósforo no exsudato xilemático de ambas as espécies reduziu com a diminuição da umidade dos solos.

---

\*Comitê Orientador: Roberto Ferreira de Novais - UFV (Orientador), Liovando Marciano da Costa - UFV e Nairam Félix de Barros - UFV.

## ABSTRACT

**RIBEIRO, Marco Aurélio Vitorino. Soybeans and eucalyptus response to phosphorus under different soil texture, soil density, and soil humidity. Lavras: UFLA, 1999. 71p. (Thesis - Doctorate in Soil Science and Plant Nutrition)\***

A greenhouse study was conducted at the Soil Science Department of Federal University of Viçosa using two Oxisols (Latosols) with different texture in order to evaluate the effect of soil density, phosphorus (P) doses, and soil humidity in the growth of soybeans and eucalyptus. A first experiment used three soil densities (0.90 -natural density, 1.10, and 1.30 g cm<sup>-3</sup>) and five doses of P (0, 100, 200, 400 and 800 mg dm<sup>-3</sup>) for a clayey Dark-Red Latosol (DR); for a sandy-loam Yellow-Red Latosol (YR), soil densities were 1.30 (natural density), 1.50, and 1.70 g cm<sup>-3</sup> whereas P doses were 0, 75, 150, 300, and 600 mg dm<sup>-3</sup>. Both soils were conditioned in 1.6-dm<sup>3</sup> plastic pots. A second experiment used the technique of subdivided roots with split pots of 2.4-dm<sup>3</sup> volume each. One of the compartments contained the following treatments: two Oxisols (the same ones of the first experiment), two soil densities (0.90 and 1.20 g cm<sup>-3</sup> in the DR soil and 1.30 and 1.70 g cm<sup>-3</sup> in the YR soil), one P dose (400 mg dm<sup>-3</sup> in the DR soil and 300 mg dm<sup>-3</sup> in the YR soil), and four levels of soil humidity applied at the end of the experiment according to the data collecting time. The other compartment held a nutrient solution without P, common to all treatments. The results showed that: i) increasing soil density decreased the growth of both species; ii) plant response to P decreased with increasing soil density; iii) increasing soil density was more harmful to the growth of the plants in the DR than in the YR soil; iv) the eucalyptus absorbed the applied P more efficiently than did the soybeans; v) increasing soil density decreased the volume of plant xylematic exudate; and vi) the P concentration in the xylematic exudate of both species decreased as soil humidity decreased.

---

\*Guidance Committee: Roberto Ferreira de Novais - UFV (Major Professor), Liovando Marciano da Costa - UFV and Nairam Félix de Barros - UFV.

# CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

Boa parte dos solos da região de cerrados no Brasil apresenta condições físicas favoráveis ao desenvolvimento e crescimento das plantas, tais como: profundidade, porosidade e condutividade hidráulica. Estes solos apresentam retenção de umidade variável entre as diferentes classes. Essas características, aliadas às condições de topografia, revelam um quadro favorável à implantação de uma agricultura mecanizada. Como limitações iniciais à sua utilização intensiva, estão a sua elevada acidez, a saturação por alumínio e a baixa fertilidade natural.

A intensa mecanização tem provocado alterações na estrutura do solo, proporcionando condições desfavoráveis ao crescimento das plantas, decorrentes da formação de camadas compactadas. Estas camadas apresentam reduções na macroporosidade e, conseqüentemente, comprometem a condutividade hidráulica do solo saturado, favorecendo a formação de ambiente redutor. A menor aeração do solo altera, qualitativa e quantitativamente, a disponibilidade dos nutrientes e de elementos tóxicos às plantas, o pH e a atividade microbiológica. Ainda, a compactação do solo, a medida que reduz os macroporos e aumenta os microporos, favorece o aumento no volume de água retida a maiores tensões, propiciando a criação de ambiente redutor, com reflexo nos mecanismos de fluxo de massa e difusão, importantes no suprimento de nutrientes às raízes das plantas.

A baixa disponibilidade de fósforo na maioria dos solos sob vegetação de cerrado transforma esse nutriente em objetivo de freqüentes estudos, visando analisar os diversos mecanismos reguladores do seu suprimento aos vegetais. Considerando que a disponibilidade de fósforo para as plantas depende da

quantidade adsorvida na superfície das partículas, da atividade na solução do solo, da capacidade do fósforo adsorvido passar à solução, bem como do transporte na solução do solo até alcançar as raízes, observa-se uma concentração de trabalhos de pesquisa envolvendo os primeiros fatores que regulam o fornecimento do nutriente.

↳ O transporte do fósforo na solução do solo, processo altamente dinâmico e apontado como o mecanismo limitante à disponibilidade desse nutriente, é regulado por diversos fatores, dentre os quais se destacam o teor de água do solo, a interação do fósforo com os colóides do solo e a distância a percorrer até atingir as raízes das plantas.

O objetivo do presente trabalho foi avaliar os efeitos de níveis de densidade e de umidade e doses de fósforo no crescimento da soja e do eucalipto.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Com os anos de cultivo, os solos de cerrado tendem a ter suas propriedades químicas melhoradas, ao passo que suas propriedades físicas podem se degradar. Aplicam-se doses de fósforo superiores às quantidades retiradas na forma de produtos agrícolas, proporcionando um efeito residual que tende a aumentar com os anos de cultivo. A baixa saturação por bases, que caracteriza esses solos como distróficos, é corrigida pela aplicação de calcário, de adubos potássicos, etc., para torná-los mais produtivos. Como consequência dessas correções, há forte melhoria das propriedades químicas. Por outro lado, suas propriedades físicas tendem a piorar, tanto pela ação mecânica das máquinas, quanto pela influência desses corretivos na estabilidade de agregados. O cultivo intensivo desses solos, segundo Novais e Smyth (1999), envolve o uso de máquinas agrícolas pesadas em todas as fases do cultivo, irrigação com

umedecimento e secagem, que se alternam criando um processo de empacotamento de partículas com baixa atividade de carga, a forte exposição ao sol, cultivos sucessivos num clima que os permite, mas, por outro lado, num solo que não os suporta, fazem com que suas propriedades físicas sejam gradualmente degradadas. Verifica-se desestruturação da aparente estável estrutura dos latossolos, perdas de matéria orgânica e crescente aumento da densidade do solo.

A estrutura de um solo se expressa pelo arranjo espacial das partículas sólidas e dos poros e é extremamente importante para o crescimento de raízes, em virtude de controlar, diretamente, a dinâmica da água, a aeração e a resistência do solo à penetração de raízes. Grohmann (1960) menciona que uma estrutura desejável de um solo agrícola pode, em curto espaço de tempo, deteriorar-se qualitativa e quantitativamente com o uso. De fato, vários efeitos, tanto benéficos quanto prejudiciais, oriundos do manejo do solo, podem surgir. Bidwell e Hole (1965) consideram que a velocidade de deterioração de algumas propriedades físicas do solo, induzidas pelo manejo, é, em comparação com processos pedogenéticos, muito maior, enfatizando que as modificações que ocorrem no solo dependem da natureza e das propriedades de cada um, além do uso geral ao qual ele é submetido. Uma avaliação da estrutura de diferentes classes de solos com base na densidade do solo foi feita por Thompson (1952), que observou ser a densidade do solo da maioria dos solos orgânicos menor que a unidade, com valores entre 0,60 e 0,80 g cm<sup>-3</sup>, enquanto para solos argilosos, os valores de densidade do solo podem variar de 0,80 a 1,60 g cm<sup>-3</sup>. Já Kiehl (1979) menciona valores de 0,75 a 1,00 g cm<sup>-3</sup> para solos húmiferos e turfosos; de 1,00 a 1,25 g cm<sup>-3</sup> para solos argilosos e de 1,25 a 1,40 g cm<sup>-3</sup> para solos arenosos. Apesar de os solos de cerrado, em sua maioria, serem de textura argilosa (Lopes, 1983), os valores da densidade desses solos quase sempre são menores que a unidade em função da estrutura granular que proporciona maior

porosidade e, conseqüentemente, alta infiltração de água e perda de alguns nutrientes por lixiviação. Sidiras e Vieira (1984) sugeriram que uma pequena compactação poderia proporcionar melhor retenção de umidade, temperatura mais uniforme na camada de semeadura e melhores condições de absorção de nutrientes por unidade de comprimento da raiz.

Um aumento da densidade do solo em conseqüência de uma redução no seu volume pode ou não causar compactação adicional. Por isso, pesquisadores têm encontrado efeitos benéficos (Raghavam e Mickyes, 1983; Smucker e Erickson, 1989) e adversos (Parish, 1971; Gupta e Allmaras, 1987; Raghavan, Alvo e Mickyes, 1990) da compactação do solo. Os efeitos benéficos têm sido atribuídos à melhoria do contato solo-semente (Smucker e Erickson, 1989) e ao aumento da disponibilidade de água em anos secos (Camargo, 1983; Raghavam e Mickyes, 1983). Os efeitos benéficos talvez possam ser causados pela aplicação de pressões menores do que a maior pressão à qual o solo esteve submetido no passado, enquanto os efeitos adversos talvez sejam provocados pela aplicação de pressões maiores do que sua maior pressão sofrida no passado. Portanto, segundo Dias Junior e Pierce (1996), para se ter uma agricultura sustentável, é importante conhecer os níveis de pressão que o solo suportou no passado e/ou a umidade do solo no momento das operações agrícolas, para que a compactação adicional seja evitada.

A compactação aumenta a densidade do solo e a sua resistência mecânica (Hillel, 1982; Rosa Júnior, 1984; Silva, Libardi e Camargo, 1986; Waggoner e Denton, 1989; Lebert e Horn, 1991) e diminui a porosidade total, o tamanho e a continuidade dos poros (Warkentin, 1971; Hillel, 1982; Moraes, 1984; Smucker e Erickson, 1989). Reduções significativas ocorrem principalmente no volume de macroporos, enquanto os microporos permanecem praticamente inalterados (Hillel, 1982). A compactação excessiva pode limitar a adsorção e/ou absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas

gasosas e desenvolvimento/crescimento do sistema radicular (Grohmann e Queiroz Neto, 1966; Moura Filho e Buol, 1972; Oliveira, Curi e Freire, 1983; Smucker e Erickson, 1989; Bicki e Siemens, 1991), resultando em decréscimo da produção, aumento da erosão e da potência necessária para o preparo do solo (Soane, 1990).

Durante a fase de deterioração das propriedades físicas do solo em virtude do uso agrícola inadequado, o fenômeno da compactação é comumente observado. Essa compactação pode parecer de fácil conceituação se for considerado apenas o aspecto físico, como se faz em mecânica dos solos. No entanto, em termos de agricultura, o processo é mais complexo, envolvendo também aspectos químicos, biológicos, bem como fatores climáticos e até de manejo (Bacchi, 1976).

Segundo Fernandes et al. (1983), a densidade do solo não é uma característica estática, visto que pode aumentar ou diminuir de acordo com tempo de uso, do tipo de solo e das características intrínsecas de cada um deles, as quais respondem diferentemente aos efeitos do uso agrícola e manejo. Quando ocorre aumento da densidade do solo em virtude de seu uso intensivo, Rosa Júnior (1984) observou que a compactação era mais crítica à profundidade de 10 – 25 cm. Tal fato se deve à intensa pulverização do solo com maior decomposição da matéria orgânica e diminuição da estabilidade dos agregados. Conseqüentemente, um solo pode apresentar distintos valores de densidade, segundo a intensidade do uso a que é submetido.

A formação de camadas compactadas superficiais ou subsuperficiais no perfil de alguns solos, principalmente os de cerrado intensivamente cultivados, tem sido responsabilizada pela restrição ao aprofundamento radicular e também como causa primária de erosão (Cintra e Mielniczuk, 1983; Costa et al., 1984).

Muitos são os trabalhos em que se tenta estabelecer a gênese das camadas adensadas e/ou compactadas. Estudos conduzidos por Rosa Júnior

(1984) mostraram que a calagem excessiva em solos de cerrado pode ter efeito dispersante nas argilas. Esse fenômeno pode ocorrer em virtude da substituição, no complexo de troca, do alumínio (trivalente) pelo cálcio e magnésio (bivalentes), provocando expansão na dupla camada difusa, o que, conseqüentemente, favorece a dispersão de argilas, além da elevação de pH, que afeta diretamente o balanço de carga das partículas.

A importância de cátions polivalentes na formação de agregados estáveis por meio da ligação de colóides por pontes catiônicas foi também observada por Russel e Russel (1964).

A movimentação de partículas primárias do solo pela ação do vento, chuva, agravada pelo tráfego de máquinas e implementos agrícolas, segundo Camargo (1983), é outra maneira de promover a compactação dos solos mediante a variação no volume dos mesmos quando são submetidos a uma força de compressão. Moniz (1972) classificou as causas da compactação dos solos em duas categorias: forças externas - provenientes da pressão de qualquer objeto sobre a superfície dos solos, e forças internas - provenientes de ciclos de umedecimento e secagem, dispersão de argilas e fatores genéticos derivados da evolução do solo. Uma manifestação clara da força externa, que atua na compactação do solo, pode ser percebida quando o solo é submetido à compressão. Como a parte sólida do solo é rígida e praticamente indeformável, a compactação ocorre às expensas da diminuição do volume dos poros, notadamente macroporos (Tackett e Pearson, 1964; Fernandes, 1982). Esses autores ressaltaram ainda que o conteúdo de umidade, a matéria orgânica, a textura e a estrutura do solo exercem influência na susceptibilidade do solo à compactação.

A influência da textura do solo no grau de compactação foi estudada por Raney e Edminister (1965), observando que solos de textura média a moderadamente grosseira são mais susceptíveis à compactação. Dois solos

argilosos, com uma mesma distribuição granulométrica, podem apresentar grandes diferenças nas propriedades coloidais, dependendo do tipo de mineral presente, bem como o seu arranjo no material de solo.) No caso de a argila ser montmorilonítica, ocorre grande repulsão entre partículas, conferindo-lhe estrutura casualizada, mas, no caso de a argila ser caulínica, suas partículas exibem maior agregação. Assim, trabalhos de Yong e Warkentin (1975) mostraram que o comportamento dos dois tipos de argilas será diferente quando forem submetidas à mesma força de compressão externa.

As partículas de argila estão sempre envolvidas por filmes de água quando o solo está úmido. A plasticidade, a compacidade, as ligações entre as partículas e o movimento de água no solo estão intimamente relacionados com esses filmes de água adsorvida (Russel e Russel, 1964).

Para uma mesma condição, o fator que governa a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo é a umidade. Assim, quando os solos estão mais secos a sua capacidade de suporte de carga pode ser suficiente para suportar as pressões aplicadas e a compactação do solo pode não ser significativa (Taylor, 1971; Larson e Allmaras, 1971; Dias Junior, 1994). Entretanto, sob condições de alta umidade, os solos têm a resistência mecânica diminuída, ficando mais susceptíveis à deformação (Swan, Moncrief e Voohees, 1987), o que pode causar redução na produção (Negi et al., 1980 e 1990; Carter, 1985; Gameda et al., 1985; Bicki e Siemens, 1991). Em áreas que possuem um período sazonal pequeno para o crescimento de plantas ou um sistema de manejo no qual há possibilidade de três cultivos por ano, as operações de preparo são realizadas assim que os solos sejam considerados trafegáveis. Entretanto, sob essas condições climáticas e de tempo, provavelmente eles ainda poderão estar na faixa de umidade em que a compactação é favorecida (Hakansson, Voohees e Riley, 1988), e esse tráfego resultará em compactação adicional do solo.

Variações no volume de poros em função do tipo de argila foram observadas por Perecin e Campos (1978), mediante técnicas microscópicas. Verificaram que para um mesmo teor de argila, os solos oxidicos possuem maior volume de poros do que os de argila mais ativa. Uma justificativa para esse fato foi feita por Stittel et al. (1982) quando observaram que cada tipo de argila possui uma rugosidade superficial diferente, condicionando diferentes espaços porosos entre elas.

O conteúdo de umidade e a condutividade hidráulica do solo são importantes fatores determinantes do estado de compactação. Assim, Camargo (1983) observou que em condições de saturação, a quantidade de água retida pelo solo diminui com a compactação, seguindo de perto a diminuição da porosidade total. Taylor e Gardner (1963) afirmaram ainda que isso acontece em virtude do aumento do número de pequenos poros e, conseqüentemente, da diminuição dos macroporos. Pouco aproveitamento das águas das chuvas, em razão do aumento do escoamento superficial de água, constante saturação do perfil, causando danos às raízes por condições de redução química; toxidez de ferro e/ou manganês; e menor transporte de nutrientes em direção às raízes são algumas das conseqüências agronômicas advindas da redução da infiltração da água em virtude da compactação do solo.

A aeração dos solos é de grande importância para o desenvolvimento dos vegetais e microrganismos do solo, condicionando-lhes a vida, nesse ambiente, mediante adequado balanceamento da relação oxigênio/gás carbônico. Grable (1966) e Camargo (1983) citam ainda que a formação de substâncias tóxicas aos vegetais, alterações de pH e disponibilidade de nutrientes são aspectos muito influenciados pela aeração do solo. Como a aeração é muito dependente da porosidade do solo, a compactação, ao alterá-la, altera também o ambiente próximo das raízes (Reichardt, 1975).

Embora a compactação possa provocar grandes restrições às trocas gasosas entre o solo e a atmosfera, podendo causar, em curto espaço de tempo, danos irreparáveis ao sistema radicular de muitas plantas, trabalhos de campo têm demonstrado que sob determinadas condições, a compactação não chega a modificar sensivelmente a composição gasosa do solo.

Vomocil e Flocker (1961), revisando as relações existentes entre o espaço poroso ocupado pelo ar e pela água, verificaram que um pequeno movimento de ar ainda ocorre no solo quando a porosidade é reduzida em 90%. Essa porcentagem de redução na porosidade, no entanto, já é considerada como nível de restrição ao desenvolvimento normal das plantas. A difusibilidade do ar no solo ( $D$ ) aumenta proporcionalmente com a porosidade ( $P$ ), conforme a expressão  $D = P^{10^3}$ , no intervalo de 10 a 40% de poros, conforme observado por Grable (1966).

As exigências das plantas pelo oxigênio foram estudadas por Eaves, Ratliff e Taylor (1969) em plantas de algodão, verificando-se que havia acentuada redução no crescimento de raízes quando o conteúdo de oxigênio reduziu de 21 para 3%. Esse limitado crescimento de raízes, em razão da baixa concentração de oxigênio, pode ser conseqüência de redução na pressão de turgescência da célula ou mesmo de uma maior resistência da parede celular ao alongamento induzido pela deficiência de oxigênio. Erickson (1964), trabalhando com tomateiro, e Leonard e Pinckard (1946), com algodoeiro, afirmaram que o principal problema refere-se à deficiência de oxigênio e não tanto ao excesso de gás carbônico.

Cintra e Mielniczuk (1983) observaram redução no espaço aéreo abaixo do mínimo necessário para o crescimento de raízes, quando a densidade do solo era superior a  $1,30 \text{ g cm}^{-3}$ . Isso ocasionou 50% de redução no comprimento das raízes para as culturas de trigo, colza, cevada, tremoço e soja. Esses mesmos autores observaram ainda que as culturas de trigo e soja responderam

positivamente ao aumento da densidade em até  $1,04 \text{ g cm}^{-3}$ , graças a um melhor arranjo das partículas, melhorando a retenção de água e a liberação de nutrientes. Uma redução linear na velocidade de crescimento das raízes foi observada por Phillips e Kirkhan (1962) quando a densidade variou de 0,94 para  $1,30 \text{ g cm}^{-3}$ . Nessas condições, o comprimento das raízes decresceu de 52 para 10 cm. A capacidade das raízes de penetrar em solo compactado, segundo Veihmeyer e Hendricks (1948), varia entre solos e também entre plantas. Quase sempre o valor limite situa-se em torno de  $1,75 \text{ g cm}^{-3}$  para solos arenosos e  $1,45 \text{ g cm}^{-3}$  para solos argilosos. Trabalhando com milho e cevada em solos compactados, Shierlaw e Alston (1984) encontraram pequeno crescimento de raízes no solo com densidade de  $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ , mostrando também que as raízes de nenhuma das culturas atravessaram completamente essa camada compactada.

A disponibilidade de nutrientes para as plantas é também influenciada pela compactação do solo, já que os mecanismos de fluxo de massa e difusão, responsáveis pelo transporte de nutrientes até as raízes, são processos dependentes da estrutura do solo. Além de modificar os mecanismos pelos quais os nutrientes são transportados no solo, Kemper et al., citados por Bacchi (1976), afirmam que a compactação pode alterar a quantidade de nutrientes disponíveis, na medida em que altera também a mineralização de compostos orgânicos, por afetar a aeração e a umidade do solo.

Uma forte redução na absorção de fósforo pela cana-de-açúcar foi observada por Juang e Uehara (1969) com o aumento da compactação do solo. Contudo, Shierlaw e Alston (1984) verificaram que a habilidade das plantas em absorver fósforo em camadas compactadas varia entre espécies, dependendo da habilidade das raízes de cada espécie para crescer dentro dessas camadas. Esses autores não encontraram diferença significativa na absorção de fósforo pelas raízes de milho quando a densidade do solo variou de 1,20 a  $1,75 \text{ g cm}^{-3}$ , enquanto, na cevada, o efeito da compactação foi marcante, ocorrendo um

máximo de absorção quando a densidade situava-se entre 1,35 a 1,45 g cm<sup>-3</sup>. Trabalhando com diferentes doses de fósforo e níveis de densidade do solo, Ribeiro et al. (1985) observaram efeito detrimental na absorção de fósforo por plantas de soja, à medida que se aumentou a densidade do solo, praticamente não havendo resposta a doses de fósforo na densidade de 1,30 g cm<sup>-3</sup>. Nesta densidade mais elevada, o impedimento mecânico foi mais sério ou mais limitante do que a disponibilidade de fósforo.

A deficiência nutricional em solos compactados pode também ser consequência da transformação de um nutriente em outra forma ou produto não absorvido pelas plantas, como é o caso do fósforo, que pode se transformar em fosfina, tóxica para as plantas, como relatado por Gavande (1972).

Trabalhando com várias culturas em solos compactados, Eaves, Ratliff e Taylor (1969) destacaram a habilidade do sistema radicular do algodão e do amendoim em vencer a resistência oferecida pelo solo, encontrando uma pressão de raízes axiais de 13 bars (12,7 kg cm<sup>-2</sup>) para essas culturas. Esses autores esclarecem, porém, que esse valor de pressão axial pode ser menor se o suprimento de oxigênio for deficiente.

O tipo de raiz pertencente à 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 em solos com alta densidade. Desse modo, Cintra e Mielniczuk (1983) observaram que colza e tremoço apresentaram raízes em solos com densidade de 1,30 g cm<sup>-3</sup>, enquanto soja, por possuir raízes pivotantes de grande diâmetro, não apresentou penetração nessa densidade do solo. Fato semelhante foi também observado por Edwards, Fehrenbacher e Varva (1964) com milho, em que as raízes mais grossas só ocorriam entre os agregados, enquanto as raízes médias e finas eram também encontradas dentro de agregados. Nos agregados com densidade do solo acima de 1,80 g cm<sup>-3</sup>, não se verificava a presença de raízes.

A penetração de raízes em solos compactados pode ocorrer sempre que o diâmetro das raízes for menor do que o dos poros (Wiersun, 1957; Grohmann e Queiroz Neto, 1966). Estudos da influência do tamanho e rigidez dos poros na penetração de raízes foram também realizados por Albertin e Kardos (1965ab) com plantas de milho, em que o tamanho dos poros variava de 36 a 412  $\mu\text{m}$ . Quando o solo não foi compactado, as raízes cresciam igualmente bem, tanto nos poros de 36  $\mu\text{m}$  quanto nos de 412  $\mu\text{m}$ . Entretanto, quando houve compactação, os autores verificaram que poros com diâmetro abaixo de 138  $\mu\text{m}$  afetaram o crescimento das raízes.

Segundo Bacchi (1976), quando a compactação ocorreu subsuperficialmente (10 – 20 cm), o crescimento de raízes da cana-de-açúcar foi mais prejudicado em comparação com a compactação uniforme do perfil. A justificativa para isso foi a de que quando o perfil é uniformemente compactado, a penetração de raízes inicia-se logo após a emergência, estágio em que as raízes encontram-se ainda finas e com capacidade de penetrar apenas em poros pequenos. No caso de a compactação ser subsuperficial, as raízes, ao atingirem a camada compactada, já se encontram com um diâmetro bem maior do que o dos poros daquela camada de solo.

As menores respostas às adubações observadas em muitos solos cultivados, em boa parte seriam resultantes da degradação das propriedades físicas desses solos. Essa degradação tem levado ao aumento da densidade do solo, aumentando a adsorção de fósforo, preferencialmente ao fluxo difusivo. A compactação aumenta a participação de microporos e a energia de retenção de água no solo; aumenta a viscosidade da água e a interação de íons de fosfato e superfícies dos colóides ao longo de sua trajetória de difusão, fazendo com que o fosfato tenha de se difundir cada vez mais próximo de superfícies positivamente carregadas. Para que o fósforo continue chegando até as raízes, doses cada vez maiores terão de ser aplicadas de modo a aumentar a saturação por fósforo

nessas superfícies adsorventes e possibilitar a manutenção do fluxo difusivo em níveis mais adequados, em termos de demanda da planta (Novais e Smyth, 1999).

A análise desses solos pode indicar teor alto de “fósforo disponível”, enquanto a planta apresenta acúmulo baixo. Assim, doses requeridas para manutenção da produtividade têm de ser mais elevadas, particularmente nos solos com maior capacidade de adsorção de fósforo.

Existe, portanto, necessidade de estudos objetivando avaliar a interação água, densidade do solo e fluxo difusivo de fósforo, particularmente em solos mais intemperizados, com maior adsorção deste elemento.

O processo de difusão foi apontado, quase unicamente, como o mecanismo fundamental para o transporte de fósforo no solo (Barber, 1974 e Nye e Tinker, 1977). A difusão de fósforo no solo ocorre essencialmente na fase líquida, sendo extremamente lenta em decorrência de três fatores: a) a água do solo ocupa apenas parte do volume livre (“vazio”) total do solo, limitando, assim, o volume para difusão; b) o caminho da difusão é tortuoso; e c) a maior parte do fósforo que pode ser difundido está adsorvido à superfície das partículas do solo com as quais está em equilíbrio, tamponando, assim, a quantidade de fósforo que está sendo difundido (Barber, 1980).

Estudos de difusão do fósforo acentuaram-se com a utilização do isótopo  $^{32}\text{P}$  nas pesquisas com solos e plantas. Os primeiros trabalhos, não muito satisfatórios (Hende e Loose, 1954), procuraram avaliar, de forma mais qualitativa, tanto o comportamento dos adubos fosfatados como a influência das diversas propriedades do solo sobre a difusão. Nessa linha, a importância da difusão foi provada ser fundamental, por técnicas auto-radiográficas (Bhat e Nye, 1973; Temple-Smith e Menary, 1977).

O aumento de doses de nutrientes e alterações em condições do solo relacionadas com o valor do coeficiente de difusão (D), tais como o aumento no

conteúdo volumétrico de água do solo ( $\theta$ ), são responsáveis pelo aumento da difusão. Adicionalmente, medidas de  $D$  para diferentes condições de solos estão inteiramente relacionadas com a absorção de nutrientes (Barber, 1974), existindo, portanto, uma relação direta entre o conteúdo de água do solo e a difusão de fósforo.

Com o aumento do teor de umidade, o filme de água das partículas sólidas do solo fica mais espesso, diminuindo a interação íon-colóide e, paralelamente, incrementa-se a quantidade do nutriente na solução do solo, mantendo-se uma relação do valor inverso da capacidade tampão do solo aproximadamente constante para cada nível de fósforo. Diversos autores registraram a relação direta do conteúdo de água do solo e a difusão de fósforo, tais como Harrell e Saeed (1980), Remer e Schilling (1981), Sanzharova e Aleksakhin (1982) e Novais e Smyth (1999).

Considerando a interdependência entre o teor de fósforo e conteúdo de água no solo, ao se reduzir o teor de umidade do solo, deve-se aumentar a quantidade de fósforo aplicado para a manutenção de uma razoável difusão desse elemento. Essa afirmativa surgida de trabalhos experimentais de laboratório (Mahtab et al., 1971) foi confirmada em ensaios de casa-de-vegetação usando  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  como fonte de fósforo até um valor máximo de  $100 \text{ mg kg}^{-1}$ , para quatro solos de diferentes texturas e três conteúdos de água (Mahtab et al., 1972).

Portanto, a difusão do fósforo responde fundamentalmente ao nível de fósforo e ao teor de umidade do solo. Uma forma de avaliar esses fatores combinados seria a determinação dos valores críticos de fósforo, associados a diferentes conteúdos de água no solo. Bailey, Aitken e Hughes (1983), estudando o efeito de faixas de potencial matricial na concentração crítica de fósforo em *Stylosanthes* sp, determinaram a massa seca e o teor de fósforo na parte aérea, 10 e 14 semanas após a emergência das plantas, nas faixas de

potenciais 0 até  $-0,01$ ,  $-0,01$  até  $-0,1$  e  $-0,1$  até  $-1,5$ MPa. Nos dois períodos de crescimento, houve uma diminuição da massa seca nas faixas de menor potencial matricial. O teor de fósforo no vegetal, estimado no nível crítico, aumentou nas faixas de menor umidade para o corte de 10 semanas. Esse comportamento, semelhante ao relatado por Cannell, Tyler e Asbell (1959), discorda da maioria dos trabalhos, que indicam um incremento do teor de fósforo no vegetal, com o aumento da disponibilidade de água para as plantas (Hibbard e Nour, 1959; Mederski e Wilson, 1960; Fisher, 1980). Na colheita realizada após 14 semanas de emergência, estudada por Bailey, Aitken e Hughes (1983), a concentração crítica de fósforo na parte aérea não registrou variação para as diferentes faixas de umidade, sendo significativamente menor do que a determinada na colheita após 10 semanas. Os autores atribuíram essa diminuição da concentração crítica de fósforo, com o tempo, a um processo de envelhecimento do vegetal.

O efeito do conteúdo de água do solo sobre a difusão de fósforo em amostra de um Latossolo-Vermelho Amarelo textura média de cerrado, cultivado com soja em casa-de-vegetação, foi estudado por Ruiz et al. (1988). Os resultados mostraram que mesmo para uma elevada dose de fósforo, como  $240 \text{ mg kg}^{-1}$  de fósforo solo, o fluxo xilemático de fósforo nas plantas caiu mais de trezentas vezes quando o conteúdo de água retida a  $-0,01$  MPa caiu para aquele correspondente a  $-0,3$  MPa. Neste mesmo trabalho, verificou-se ainda que o acúmulo de fósforo no exsudato xilemático, para os tratamentos de potencial matricial  $-0,04$  e  $-0,30$  MPa, estabiliza-se praticamente a partir de  $60 \text{ mg kg}^{-1}$  de fósforo solo, mostrando, acima desse valor, uma resposta pouco acentuada às doses crescentes de fósforo. Por outro lado, os tratamentos de potencial matricial  $-0,01$  MPa apresentam um incremento pronunciado do conteúdo de fósforo, tanto em relação aos outros tratamentos com menor disponibilidade de água, quanto na resposta às aplicações do nutriente. Isso

mostra a importância fundamental da água como veículo para a difusão do fósforo até as raízes da planta, evidenciando-se que a incorporação de doses relativamente menores de fósforo, com um manejo adequado da água para assegurar as melhores condições para a difusão, apresenta efeito positivo mais acentuado que o decorrente da incorporação de grandes quantidades de fósforo, com oscilações pronunciadas do conteúdo de água.

Esses mesmos autores concluíram que o volume de exsudato xilemático evidenciou uma marcante dependência em relação à disponibilidade de água do solo, no intervalo de potencial matricial de  $-0,04$  até  $-0,01$  MPa, com incremento de até trinta vezes no valor de  $-0,01$  MPa. Essa mesma variável foi pouco influenciada pela disponibilidade de água na faixa de  $-0,30$  até  $-0,04$  MPa, independente do tipo de solo e do fósforo aplicado. O conteúdo de fósforo no exsudato aumentou acentuadamente com as doses de fósforo nos tratamentos de potencial matricial  $-0,01$  MPa, registrando-se incremento desprezível nos tratamentos de potencial matricial  $-0,04$  e  $-0,30$  MPa. Isso evidenciaria a importância fundamental da água como veículo para a difusão do fósforo, independente do nível do nutriente no solo, como também a influência da composição mineralógica e granulométrica, promovendo variações na fixação de fósforo nos solos.

Resultados semelhantes foram obtidos por Dunham e Nye (1976) ao observarem que a redução do conteúdo de umidade do solo de um potencial de  $-0,01$  para  $-0,33$  MPa reduziu a absorção de fósforo por plantas de cebola em aproximadamente 10 vezes.

O suprimento adequado de água a apenas um dos dois vasos geminados, entre os quais o sistema radicular do tomateiro foi subdividido, e de três níveis de umidade no outro vaso, mostrou que para o menor nível testado (4% de umidade), o crescimento das raízes foi sete vezes menor e a absorção de fósforo,

30 vezes menor em comparação ao tratamento em que a umidade inicial do solo era de 22% (-0,1 MPa) (Thorup, 1969).

Considerando-se a interação colóide- fósforo, a difusão será menor em solos argilosos (Benko, 1963; Olsen e Watanabe, 1970). Também o aumento do teor de óxidos de ferro e alumínio dificulta a difusão do fósforo no solo pelo aumento causado no poder de adsorção (Place, Phillips e Brown, 1968).

Associando textura e água no solo, para um mesmo conteúdo volumétrico, os solos argilosos, com menor fator de impedância e maior interação íon-colóide, terão menor difusão. Pelo contrário, quando se iguala o potencial hídrico, a difusão será maior no solo argiloso, por ter maior conteúdo volumétrico de água para a mesma energia de retenção. Nessa condição, o aumento do fator de impedância supera a maior interação entre íon e colóide nos solos argilosos (Nye, 1979; Ruiz, 1986).

Villani et al. (1993), estudando a difusão de fósforo em solos com diferentes texturas e níveis de umidade, observaram que no solo mais argiloso (LE), mesmo com doses de fósforo maiores do que aquelas testadas no LVm (a CMAP no primeiro é maior), a difusão foi, para as condições de umidade a -0,01 MPa, de duas a três vezes maior no LVm. Outro detalhe importante é que enquanto a difusão aumenta 1,28 vezes no LE com a duplicação da dose de fósforo (diferença não significativa), ela foi de 1,81 vezes maior no LVm, nessa mesma comparação. Isso indica ser mais efetivo aumentar a dose de fósforo no solo mais arenoso que no argiloso. Outra comparação que também mostra o grande contraste entre os solos é aquela entre os tratamentos com fósforo e a testemunha, para o mesmo teor de umidade (-0,033 MPa). Enquanto para o LE a maior dose de fósforo aplicada provoca um aumento de apenas 2,29 vezes na difusão, no LVm o aumento correspondente foi de 22,8 vezes, mesmo tendo o LE mais fósforo disponível inicialmente - 4,8 mg kg<sup>-1</sup> contra 0,8 mg kg<sup>-1</sup> para o LVm. Numa comparação semelhante entre a dose equivalente à CMAP (com

umidade a  $-0,01$  MPa) e a testemunha, verificou-se um valor de 3,52 vezes para o LE contra 66,2 vezes no LVm (Villani et al., 1993). O problema da difusão de fósforo nos solos com maior adsorção fica mais evidente quando se verifica que com a aplicação de uma vez, a CMAP ( $23 \text{ t ha}^{-1}$  superfosfato simples, aproximadamente) no LE, tem-se menor difusão quando o teor de umidade cai para  $-0,1$  MPa do que na testemunha sem adição de fósforo ( $1 \text{ mg kg}^{-1}$  de fósforo, com a umidade em  $-0,033$  MPa). Para o LVm, comparando-se os mesmos tratamentos, tem-se, ainda, uma difusão 6,8 vezes maior do que na testemunha.

Quando as tabelas de recomendação de fertilizantes e corretivos indicam a mesma dose de fósforo para qualquer solo, independente de sua textura, não se compreende a razão para esse procedimento, embora seja evidente a razão para, em assim fazendo, os solos de texturas médias e os arenosos serem mais produtivos que os argilosos (Villani et al., 1993).

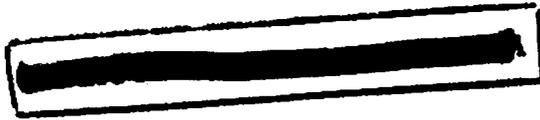
Dada a interdependência entre o teor de fósforo e o conteúdo de água, Mahtab et al. (1971 e 1972) afirmam que para se manter uma razoável velocidade de difusão de fósforo no solo, deve-se aumentar a quantidade de fósforo para compensar uma diminuição do teor de umidade. Todavia, pelos dados de Villani et al. (1993), essa compensação teria que ser obtida com aumentos exageradamente elevados da fertilização fosfatada para compensar pequenas perdas de umidade do solo. Conclui-se, portanto, que o efeito depressivo da menor disponibilidade de água no solo sobre a difusão de fósforo será bem mais drástico nos solos mais argilosos e, de maneira particular, nos mais intemperizados, com grande fator capacidade deste nutriente.

### 3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUBERTIN, Y.M.; KARDOS, L.T. Root growth in porous media under controlled conditions. I. Effect of pore size and rigidity. *Soil Science Society American Proceedings*, v.29, p.290-293, 1965a.
- AUBERTIN, Y.M.; KARDOS, L.T. Root growth in porous media under controlled conditions. II. Effect of aeration levels and rigidity. *Soil Science Society American Proceedings*, v.29, p.363-365, 1965b.
- BACCHI, O.O.S. Efeito da compactação sobre o sistema solo-planta em cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum* ssp.). Piracicaba: ESALQ, 1976. 65p. (Dissertação – Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
- BAILEY, S.W.; AITKEN, R.L.; HUGHES, J.D. The effect of soil water status on critical phosphorus concentrations in *Stylosanthes hamata* cv. Verono. *Plant and Soil*, v.74, p.467-472, 1983.
- BARBER, S.A. Influence of the plant root on ion movement in soil. In: CARSON, E.W. *The plant root and its environment*. Charlottesville: University of Virginia, 1974. p.525-564.
- BARBER, S.A. Soil-plant interactions in the phosphorus nutrition of plants. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. *The role phosphorus in agriculture*. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1980. p.591-615.
- BENKO, V. Phosphorus diffusion in soil. *Soil & Fert.*, Oxford, v.26, p.227, 1963.
- BHAT, K.K.S.; NYE, P.H. Diffusion of phosphate to plant roots in soil. I. Quantitative autoradiography of the depletion zone. *Plant and Soil*, v.38, p.161-175, 1973.
- BICKI, T.J.; SIEMENS, J.C. Crop response to wheat traffic soil compaction. *Transaction of ASAE*, St. Joseph, v.34, p.909-913, 1991.
- BIDWELL, D.W.; HOLE, F.D. Man as factor fo soil formation. *Soil Science*, v.99, p.67-72, 1965.
- CAMARGO, O.A. Compactação do solo e desenvolvimento de plantas. Campinas: Cargil, 1983. 44p.

- CANNELL, G.H.; TYLER, K.B.; ASBELL, C.W. The effects of irrigation and fertilizer on yield, black-heart and nutrient uptake of celery. **Proceedings American Society Horticulture Science.**, v.74, p.539-545, 1959.
- CARTER, L.M. Wheel traffic is costly. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.28, p.430-434, 1985.
- CINTRA, F.L.D.; MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, n.2, p.197-201, maio/ago. 1983.
- COSTA, L.M.; SEDIYAMA, T.; SEDIYAMA, C.S.; NOVAIS, R.F.; BRUNELI, 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**, Viçosa, 1984. Anais ... Viçosa: UFV, 1984. p. 113-114.
- DIAS JUNIOR, M de S. Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic. East Lansing: Michigan State University, 1994. 114p. (Tese – Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)
- DIAS JUNIOR, M. de S.; PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, n.2, p.175-182, maio/ago. 1996.
- DUNHAM, R.J.; NYE, P.H. The influence of soil water content on the uptake of ions by roots. III. Phosphate, potassium, calcium and magnesium uptake and concentration gradients. **Journal Applied Ecology**, Oxford, v.13, p.967-984, 1976.
- EAVES, B.W.J.; RATLIFF, L.F.; TAYLOR, H.M. Use of a dead-wood technique to determine axial root growth pressure. **Agronomy Journal**, v.61, p.640-643, 1969.
- EDWARDS, W.W.; FEHRENBACHER, J.B.; VARVA, J.P. The effect of discrete ped density on corn root penetration in planosol. **Soil Science Society American Proceedings**, v.28, p.560-564, 1964.
- ERICKSON, L.C. Growth of tomato roots as influenced by oxygen in the nutrient solution. **American Journal Botany**, v.33, p.551-561, 1964.

- FERNANDES, B.; GALLOWAY, H.M.; BRONSON, R.D.; MANNERING, J.V. Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição de poros, em dois solos (Typic Argiaquoll e Typic Hapludalf). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, n.3, p.329-333, set./dez. 1983.
- FERNANDES, M.R. **Alterações em propriedades de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, fase cerrado, decorrente da modalidade de uso e manejo**. Viçosa: UFV, 1982. 65p. (Dissertação - Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)
- FISHER, M.J. The influence of water stress on nitrogen and phosphorus uptake and concentrations in townsville stylo (*Stylosanthes humilis*). **Aust. Journal Exp. Agricultural Auim. Husb.**, v.20, p.175-180, 1980.
- GAMEDA, S.; RAGHAVAN, G.S.V.; THERIAULT, R., MICKYES, E. High axle load compaction and corn yield. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.28, p.1759-1765, 1985.
- GAVANDE, S.A. **Física de suelos**. México: Centro Regional de Ayuda Técnica (AID), 1972. 315p.
- GRABLE, A.R. Soil aeration and plant growth. **Advance Agronomy**, v.18, p.57-106, 1966.
- GROHMANN, F. Distribuição e tamanho de poros em três tipos de solo do Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.19, n.21, p.319-328, abr.1960.
- GROHMANN, F.; QUEIROZ NETO, J.P. Efeito da compactação artificial de dois solos limo-argilosos sobre a penetração das raízes de arroz. **Bragantia**, Campinas, v.25, n.38, p.421-431, dez. 1966.
- GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, London, v.6, p.65-100, 1987.
- HAKANSSON, I.; VOOHEES, W.B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.11, p.239-282, 1988.
- HARRELL, J.W.; SAEED, M. The effect of moisture on phosphorus diffusion in coal mine spoils. **Soil Science**, Baltimore, v.129, p.261-265, 1980.



- HENDE, A. van den; LOOSE, R. de. Quelques possibilités de l'usage du  $^{32}\text{P}$  dans l'étude de la fertilité du sol et de la nutrition des plantes. *Trans. fifth Int. Congr. Soil Science*, v.3, p.252-256, 1954.
- HIBBARD, A.D.; NOUR, M. Leaf content of phosphorus and potassium under moisture stress. *Proceedings American Society Horticulture Science*, v.73, p.33-39, 1959.
- HILLEL, D. *Introduction to soil physics*. San Diego: Academic, 1982. 264p.
- JUANG, T.C.; UEHARA, G. Effects of ground-water table and soil compaction on nutrient element uptake and growth of sugarcane. *Proc. Int. Soc. Can. Technology*, v.58, p679-687, 1969.
- KIEHL, E.J. *Manual de edafologia*. São Paulo: Ceres, 1979. 269p.
- LARSON, W.E.; ALLMARAS, R.R. Management factors and natural forces as related to compaction. In: BARNES, K.K.; CARLETON, W.N.; TAYLOR, H.M.; THROCKMORTON, R.J.; VANDENBERG, G.E. (eds.). *Compaction of agricultural soils*. St. Joseph: ASAE, 1971. p.367-427.
- LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil Tillage Research*, Amsterdam, v.19, p.274-286, 1991.
- LEONARD, O.A.; PINCKARD, J.A. Effect of various oxygen and carbon dioxide concentration on cation root development. *Plant Physiology*, v.21, p18-36, 1946.
- LOPES, A.S. Solos sob "cerrado": características, propriedades e manejo. Piracicaba: POTAFOS, 1983. 162p.
- MAHTAB, S.K.; GODFREY, C.L.; SWOBODA, A.R.; THOMAS, G.W. Phosphorus diffusion in soils. I. The effect of applied P, clay content and water content. *Soil Science Society American Proceedings*, v.35, p.393-397, 1971.
- MAHTAB, S.K.; SWOBODA, A.R.; GODFREY, C.L.; THOMAS, G.W. Phosphorus diffusion in soils. I. The effect on phosphorus uptake by plants. *Soil Science Society American Proceedings*, v.36, p.55-57, 1972.

- MEDERSKI, H.J.; WILSON, J.H. Relation of soil moisture to ion absorption by corn plants. *Soil Science Society American Proceedings*, v.24, p.149-152, 1960.
- MONIZ, A.C. *Elementos de pedologia*. São Paulo: Polígono, 1972. 459p.
- MORAES, W.V. de. *Comportamento de características e propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro, submetido a diferentes sistemas de cultivos*. Lavras: ESAL, 1984. 107p. (Dissertação - Mestrado em Solos de Nutrição de Plantas).
- MOURA FILHO, W.; BUOL, S.W. Studies of a Latosol Roxo (Enstrutox) in Brazil. *Experientiae, Viçosa*, v.13, p.201-234, 1972.
- NEGI, S.C.; MICKYES, E.; TAYLOR, F.; RAGHAVAN, G.S.V. Crop performance as affected by traffic and tillage in a clay soil. *Transaction of the ASAE, St. Joseph*, v.23, p.1364-1368, 1980.
- NEGI, S.C.; RAGHAVAN, G.S.V.; MICKYES, E.; TAYLOR, F. The effect on compaction and minimum tillage on corn yield sand soil properties. *Transaction of the ASAE, St. Joseph*, v.33, p.744-748, 1990.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*. Viçosa: UFV/DPS, 1999. 399p.
- NYE, P.H. Diffusion of ions and uncharged solutes in soils and soil clays. *Advance Agronomy*, v.31, p.225-272, 1979.
- NYE, P.H.; TINKER, P.B. *Solute movement in the soil-root system*. Berkeley: University of California, 1977. 342p.
- OLIVEIRA, M.; CURL, N.; FREIRE, J.C. Relações massa/volume em Podzólico Vermelho-Amarelo textura média/argilosa da região de Lavras (MG) sob pastagem e cultivo anual. *Ciência e Prática, Lavras*, v.7, p.66-74, 1983.
- OLSEN, S.R.; WATANABE, F.S. Diffusive supply of phosphorus in relation to soil textural variations. *Soil Science, Baltimore*, v.110, p.318-327, 1970.
- PARISH, D.H. Effects of compaction on nutrient supply to plants. In: BARNES, K.K.; CARLETON, W.N.; TAYLOR, H.M.; THROCKMORTON, R.J.; VANDENBERG, G.E. (eds.). *Compaction of agricultural soils*. St. Joseph: ASAE, 1971. p.277-291.

- PERECIN, D.; CAMPOS, D.A.F. Porosidade de solos: microestereometria. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.2, n.2, p.139-143, maio/ago. 1978.
- PHILLIPS, R.E.; KIRKHAN, A. Mechanical impedance and corn seedlings root growth. *Soil Science Society American Proceedings*, v.26, p.319-322, 1962.
- PLACE, G.A.; PHILLIPS, R.E.; BROWN, D.A. Self-diffusion of phosphorus in clays and soils. II. The effect of pH. *Proceedings American Society Horticulture Science*, Madison, v.32, p.657-660, 1968.
- RAGHAVAN, G.S.V.; ALVO, P.; MICKYES, E. Soil compaction in agriculture: a review toward managing the problem. *Advance Soil Science*, London, v.11, p.1-36, 1990.
- RAGHAVAN, G.S.V.; MICKYES, E. Physical and hydraulic characteristics in compacted clay soils. *Journal Terramechanics*, Elmsford, v.19, p.235-242, 1983.
- RANEY, W.A.; EDMINISTER, T.W. Current status fo research in soil compactions. *Soil Science Society American Proceedings*, v.19, p.423-428, 1965.
- REICHARDT, K. Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. Piracicaba: Cargill, 1975. 268p.
- REMER, W.; SCHILLING, G. Effect of the soil water regime on the diffusion coefficient of phosphate ions. *Soviet Soil Science*, v.13, p.110-114, 1981.
- RIBEIRO, M.A.V.; FABRES, A.S.; NOVAIS, R.F.; COSTA, L.M. Efeito da compactação do solo e de níveis de fósforo sobre o crescimento de soja em casa de vegetação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 20, Belém, 1985. Resumos... Campinas: SBCS, 1985. p.125.
- ROSA JÚNIOR, E.J. Efeito de sistemas de manejo e tempo de uso sobre características físicas e químicas de dois solos de Ponta Grossa.. Viçosa: UFV, 1984. 89p. (Dissertação – Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)
- RUIZ, H.A. Efeito do conteúdo de água sobre o transporte de fósforo em dois latossolos. Viçosa: UFV, 1986. 86p. (Tese – Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)

- RUIZ, H.A.; FERNANDES, B.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. Efeito da umidade do solo sobre o volume e o conteúdo de fósforo no exsudato xilemático de soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.12, n.1, p.39-42, jan./abr. 1988
- RUSSEL, E.J.; RUSSEL, E.W. *Las condiciones de suelos y el desarrollo de las plantas*. Madrid: Aguilar, 1964. 771p.
- SANZHAROVA, N.I.; ALEKSAKHIN, R.M. Uptake of  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{95}\text{Zr}$  and  $^{106}\text{Ru}$  by crops. *Soviet Soil Science*, v.14, p.55-61, 1982.
- SHIERLAW, J.; ALSTON, A.M. Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. *Plant and Soil*, v.77, p.15-26, 1984.
- SIDIRAS, N.; VIEIRA, M.J. Comportamento de um Latossolo Roxo-distrófico compactado pelas rodas de um trator na semeadura. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.19, p.1285-1293, 1984.
- SILVA, A.P. da; LIBARDI, P.L.; CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.10, n.2, p.91-95, maio/ago. 1986.
- SMUCKER, A.J.M.; ERICKSON, A.E. Tillage and compactive modifications of gaseous flow and soil aeration. In: LARSON, W.E.; BLAKE, G.R.; ALLMARAS, R.R.; VOORHEES, W.B.; GUPTA, S.C. (ed.). *Mechanics related process in structured agricultural soils*. Nato applied Sciences, 1989. p.205-221.
- SOANE, B.D. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. *Soil Tillage Research*, Amsterdam, v.16, p.179-201, 1990.
- STITTEL, R.E.; CASSEL, D.C.; WEED, S.B.; NELSON, L.A. Mechanical impedance of tillage pans in coastal plains soils and relationship with soil, physical and mineralogical properties. *Soil Science Society American Journal*, v.46, p.100-106, 1982.
- SWAN, J.B.; MONCRIEF, J.F.; VOORHEES, W.B. *Soil compaction-causes, effects and control*. Minnesota: University of Minnesota, 1987. (Agriculture Bull., 3115).

- TACKETT, J.L.; PEARSON, R.W. Oxygen requirements of cotton seedlings roots for penetration of compacted soil cores. *Soil Science American Proceedings*, v.28, p.600-605, 1964.
- TAYLOR, H.M. Root behavior as affected by soil structure and strenght. In: CARSON, E.W. *The plant root and its environment*. Charlottesville: University of Virginia, 1971. p. 28-291.
- TAYLOR, H.M.; GARDNER, H.R. Penetration of cotton seedling roots as influenced by bulk density, moisture content and strenght of soil. *Soil Science*, v.96, p153-156, 1963.
- TEMPLE-SMITH, M.G.; MENARY, R.C. Movement of  $^{32}\text{P}$  to roots of cabbage and lettuce grown in two soil types. *Communication Soil Science and Plant Analisis*, v.8, p.67-79, 1977.
- THOMPSON, L.M. *Soils and soil fertility*. London: Mc Graw-Hill, 1952. 339p.
- THORUP, R.M. Root development and phosphorus uptake by tomato plants under controlled soil moisture condition. *Agronomy Journal*, Madison, v.61, p.808-811, 1969.
- VEIHMEYER, F.J.; HENDRICKS, A.S. Soil density and root penetration. *Soil Science*, v.65, p.487-493, 1948.
- VILLANI, E.M.A.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; FONTES, L.E.F.; NEVES, J.C.L. Difusão de fósforo em solos com diferentes texturas e níveis de umidade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.17, n.3, p.343-347, set./dez. 1993.
- VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction of storage and movement of soil air and water. *Transaction of the ASAE*, v.4, p.242-246, 1961.
- WAGGER, M.G.; DENTON, H.P. Influence of cover crop and wheel traffic on soil physics properties in continuous no-till corn. *Soil Science Society American Journal*, Madison, v.53, p.1206-1210, 1989.

**WARKENTIN, B.P.** Effects of compaction on content and transmission of water in soils. In: **BARNES, K.K.; CARLETON, W.M.; TAYLOR, H.M.; THROCK-MORTON, R.I.; VANDENBERG, G.E. (eds.).** **Compaction of agricultural soils.** St. Joseph: ASAE, 1971. p.126-153.

**WIERSUM, L.K.** The relationship of the size and structural rigidity of poros to their penetration by roots. **Plant and Soil**, v.9, p.75-84, 1957.

**YONG, R.N.; WARKENTIN, B.P.** **Soil properties and behavior.** Amsterdam: Elsevier Scientific, 1975. 353p.

## CAPÍTULO 2

### NÍVEIS DE DENSIDADE E FÓSFORO NO CRESCIMENTO DA SOJA E DO EUCALIPTO

#### RESUMO

O objetivo desse trabalho foi avaliar os efeitos da densidade do solo e de doses de fósforo no crescimento da soja e do eucalipto cultivados em amostras de dois latossolos de diferentes texturas. O experimento foi conduzido em casa-de-vegetação do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa -MG, em amostras da camada superficial (0 - 20cm) de dois solos sob vegetação de cerrado, classificados como Latossolo Vermelho-Escuro - LE textura muito argilosa, amostrado no município de Sete Lagoas - MG e Latossolo Vermelho-Amarelo - LV textura franco arenosa, amostrado no município de Lassance - MG. Para o LE, utilizaram-se os níveis de densidade de 0,90 (densidade natural), 1,10 e 1,30 g cm<sup>-3</sup> e doses de fósforo de 0, 100, 200, 400 e 800 mg dm<sup>-3</sup> e para o LV, os níveis de densidade utilizados foram de 1,30 (densidade natural), 1,50 e 1,70 g cm<sup>-3</sup> e doses de fósforo de 0, 75, 150, 300 e 600 mg dm<sup>-3</sup> em vasos plásticos com capacidade de 1,6 dm<sup>3</sup>. Para a semeadura da soja, os solos receberam uma calagem visando elevar o pH a 6,0 com mistura de CaCO<sub>3</sub> + MgCO<sub>3</sub> p.a. na relação equivalente Ca:Mg de 4:1 e adubação básica de 100 mg de N; 150 mg de K; 40 mg de S; 0,82 mg de B e 4,0 mg de Zn por dm<sup>3</sup> de solo, sendo as plantas colhidas 40 dias após a semeadura. Para a semeadura do eucalipto, os solos não receberam calagem e sim a mesma adubação básica usada para a soja, sendo as plantas colhidas aos 80 dias após a semeadura. Avaliaram-se a matéria seca da parte aérea (MSPA) e de raízes (MSRA) e acúmulo de fósforo na MSPA (P-PA) e na MSRA (P-RA) para ambas as espécies e altura do eucalipto. Equações de regressão foram ajustadas para todas as variáveis em função das doses de fósforo e níveis de densidade. Os resultados mostraram que: o aumento da densidade do solo influenciou negativamente no crescimento da soja e do eucalipto; a resposta das plantas às doses de fósforo aplicadas foi menor com o aumento da densidade do solo; o efeito da densidade foi mais prejudicial ao crescimento do eucalipto do que ao da soja; o aumento da densidade do solo foi mais prejudicial ao crescimento das plantas no LE e o eucalipto foi mais eficiente na recuperação do fósforo aplicado aos solos.

## CHAPTER 2

### GROWTH OF SOYBEANS AND EUCALYPTUS AS AFFECTED BY SOIL DENSITY AND PHOSPHORUS DOSES

#### ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the effect of soil density and doses of phosphorus (P) on the growth of soybeans and eucalyptus cultivated in samples of two Oxisols with different texture and originally under "Cerrado" vegetation. Surface-layer samples (0-20 cm) of a clayey Dark-Red Latosol (DR) sampled in the city of Sete Lagoas - MG and a sandy-loam Yellow-Red Latosol (YR) sampled in the city of Lassance - MG were used for a greenhouse experiment conducted at the Soil Science Department of Federal University of Viçosa, Viçosa - MG. Three soil densities (0.90 -natural density, 1.10, and 1.30 g cm<sup>-3</sup>) and five doses of P (0, 100, 200, 400 and 800 mg dm<sup>-3</sup>) were used for the DR soil; for YR soil, soil densities were 1.30 (natural density), 1.50, and 1.70 g cm<sup>-3</sup> whereas P doses were 0, 75, 150, 300, and 600 mg dm<sup>-3</sup>. Both soils were conditioned in 1.6-dm<sup>3</sup> plastic pots. Before sowing the soybeans, both soils received a lime application (with a mixture of analytical grade CaCO<sub>3</sub> + MgCO<sub>3</sub>, in a 4:1 Ca:Mg proportion) in order to raise the soil pH to 6.0 and a base fertilization with 100 mg of N, 150 mg of K, 40 mg of S, 0.82 mg of B, and 4.0 mg of Zn per dm<sup>3</sup> of soil. The same base fertilization was used for the eucalyptus, but no lime was added to the soils. Soybean plants were harvested 40 days after the sowing, whereas eucalyptus plants were harvested 80 days after the sowing. Shoots (SDM) and roots dry matter (RDM) as well as P accumulation in the shoots (SP) and in the roots (RP) were evaluated for both species. Plant height was also evaluated for the eucalyptus. Regression equations were fitted between each variable and either P doses or soil density values. The results showed that: i) increasing soil density decreased the growth of both species; ii) plant response to P decreased with increasing soil density; iii) increasing soil density was more harmful to the eucalyptus than to the soybean plants; iv) increasing soil density was more harmful to the growth of the plants in the DR than in the YR soil; and v) the eucalyptus absorbed the applied P more efficiently than did the soybeans.

## 1 INTRODUÇÃO

A vasta área territorial brasileira, ocupada por solos de cerrado, oferece condições climáticas e topográficas adequadas à expansão da fronteira agrícola. Entretanto, a baixa disponibilidade de nutrientes, a baixa capacidade de troca de cátions, a elevada acidez, os níveis tóxicos de alumínio e de manganês e a ocorrência de veranicos, geralmente em períodos de grande demanda de água pelas culturas (Lopes, 1983), exigem a consideração de um enfoque multidisciplinar na avaliação das potencialidades reais dessa região.

Em decorrência do uso agrícola e do manejo aplicados aos solos de cerrado, nota-se, freqüentemente, melhoria nas propriedades químicas, enquanto, por outro lado, propriedades físicas, como a estrutura e características dela decorrentes, tendem a deteriorar-se. Durante o período de deterioração das características físicas do solo, a compactação tem sido a principal alteração observada (Borges, 1986).

Nos últimos anos, a pesquisa agrônômica avançou em relação à correção da acidez e fertilização dos solos sob vegetação de cerrado, visando incorporá-los ao processo produtivo (Lopes, 1983). Contudo, após um certo tempo de uso, observa-se aumento na desagregação, facilitando a movimentação vertical de argila e formação de uma camada compactada e/ou adensada subsuperficial (20 – 30 cm de profundidade), a qual refletirá negativamente na produtividade agrícola e na conservação desse recurso natural (Carvalho Júnior, 1995).

Segundo Mantovani (1987), a formação dessa camada compactada é atribuída ao uso excessivo de máquinas, implementos agrícolas e preparo do solo fora da faixa ideal de umidade. Outros pesquisadores destacam ainda no processo da compactação o efeito da alta taxa de dispersão de argila provocada, primeiro, pela rápida oxidação da matéria orgânica (Resende, 1982) e, segundo,

pelas intensas calagens e adubações que recebem esses solos como mostrado por Rosa Júnior (1984) e Sumner (1992).

A pequena disponibilidade de fósforo, observada na maioria dos solos de regiões tropicais e subtropicais, justifica estudos que visam analisar os mecanismos que controlam o suprimento desse nutriente aos vegetais. O fósforo é transportado na solução do solo predominantemente por difusão, sendo esse mecanismo regulado por diversos fatores, dentre os quais a interação do fósforo com os colóides do solo, a distância que o nutriente deve percorrer até atingir as raízes das plantas, o teor de água do solo (Wilde, 1981) e também a densidade. Variações na difusão do fósforo, causadas pela modificação desses fatores, levam a uma alteração no fornecimento do nutriente para as plantas.

O objetivo desse trabalho foi avaliar os efeitos de níveis de densidade e doses de fósforo no crescimento da soja e do eucalipto, utilizando-se amostras superficiais de dois latossolos de diferentes texturas.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Dois experimentos foram conduzidos em casa-de-vegetação do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa (MG). No primeiro cultivou-se a soja [*Glycine max* (L.) Merrill variedade Tropical] e no segundo o eucalipto (*Eucalyptus grandis*), em amostras da camada superficial (0 – 20 cm) de dois solos sob vegetação de cerrado, classificados como Latossolo Vermelho-Escuro – LE textura muito argilosa, de Sete Lagoas (MG), e Latossolo Vermelho-Amarelo – LV textura franco arenosa, de Lassance (MG). Os atributos químicos e físicos dos solos são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. Atributos químicos e físicos dos latossolos utilizados nos experimentos.

Atributos	LE	LV
pH em água <sup>1/</sup>	4,5	4,3
P Mehlich (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>1/</sup>	1,0	1,0
K Mehlich (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>1/</sup>	70	14
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) <sup>1/</sup>	0,15	0,00
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) <sup>1/</sup>	0,17	0,00
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) <sup>1/</sup>	2,40	0,20
Areia grossa (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>2/</sup>	80	610
Areia fina (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>2/</sup>	170	160
Silte (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>2/</sup>	140	40
Argila (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>2/</sup>	610	190
Umidade equivalente (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>2/</sup>	329	91
Capacidade de campo (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>2/</sup>	413	142
Densidade de partículas (g cm <sup>-3</sup> ) <sup>2/</sup>	2,53	2,65
Classificação textural <sup>1/</sup>	Muito argiloso	Franco arenoso

1/ Vettori (1969) com modificações da EMBRAPA (1979).

2/ Fernandes (1967).

O delineamento experimental usado em ambos os experimentos foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 x 3 x 5, sendo os fatores: dois solos, três níveis de densidade e cinco doses de fósforo, com quatro repetições. Para o LE, utilizaram-se os níveis de densidade de 0,90 (densidade do solo natural da amostra peneirada em malha de 4mm), 1,10 e 1,30 g cm<sup>-3</sup> e doses de fósforo de 0, 100, 200, 400 e 800 mg dm<sup>-3</sup>, e para o LV, os níveis de densidade de 1,30 (densidade do solo natural da amostra peneirada em malha de 4mm), 1,50 e 1,70 g cm<sup>-3</sup> e doses de fósforo de 0, 75, 150, 300 e 600 mg dm<sup>-3</sup>. Foram usados vasos plásticos com capacidade de 1,8 dm<sup>3</sup> com o volume dos solos ocupando 1,6 dm<sup>3</sup>.

Para o plantio da soja, porções suficientes de ambos os solos peneirados em malha de 4 mm receberam uma correção com CaCO<sub>3</sub> + MgCO<sub>3</sub> p.a., na relação equivalente Ca:Mg de 4:1, visando elevar o pH a 6,0, cujas doses foram estabelecidas por curvas de incubação em ensaio preliminar. Após

homogeneização, os solos permaneceram incubados por 30 dias com umidade aproximada à capacidade de campo. Para o plantio do eucalipto, os solos não receberam correção, mas apenas uma dose de  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , suficiente para elevar o Mg a  $0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , aplicada junto com a adubação básica.

Após o período de incubação, os solos foram secos ao ar, peneirados em malha de 4 mm e avaliados os respectivos teores de umidade para se calcular os pesos necessários para ocupar o volume de  $1,6 \text{ dm}^3$  nos vasos e atender as densidades propostas.

As porções de cada solo assim estabelecidas foram pesadas e colocadas em sacos plásticos, em que receberam as doses de fósforo referentes aos tratamentos e uma adubação básica de semeadura, que correspondeu por  $\text{dm}^3$  de solo, a: 100 mg de N; 150 mg de K; 40 mg de S; 0,82 mg de B e 4,0 mg de Zn. Utilizaram-se como fontes dos nutrientes os seguintes reagentes p.a.:  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$  e  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , aplicados na forma de solução. Na dose mais elevada de fósforo em cada solo, foi usado também, como fonte de fósforo, o superfosfato triplo comercial (P = 19,74% e Ca = 13,75%), aplicado na forma de pó. O cálcio presente no superfosfato triplo foi compensado, nas demais doses de fósforo, pela aplicação de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  em solução.

Após a aplicação dos tratamentos de fósforo e da adubação básica, as porções dos solos foram incubadas em sacos plásticos por 20 dias, com umidade aproximada à capacidade de campo. Após este período, os solos foram novamente secos ao ar, peneirados em malha de 4 mm. Os níveis de densidade foram obtidos colocando-se camadas sucessivas de solo de aproximadamente 3cm de espessura, sobre as quais exerceu-se a pressão suficiente por meio de êmbolo, para que o peso de solo calculado para cada nível de densidade ocupasse o volume de  $1,6 \text{ dm}^3$  no vaso.

Os dois experimentos, o de soja e o de eucalipto, foram conduzidos simultaneamente, mantendo-se a umidade dos solos a 80% do volume total de poros (Freire et al., 1980) por meio de pesagens diárias dos vasos e adição de água destilada para repor a água evapotranspirada.

Para a soja, que não recebeu inoculação, conduziram-se três plantas por vaso, aplicando-se, aos 25 dias após a semeadura, 25 mg dm<sup>-3</sup> de N na forma de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Aos 40 dias após a semeadura, procedeu-se o corte das plantas, separando-se a parte aérea e raízes. Para o eucalipto, conduziram-se também três plantas por vaso, aplicando-se, aos 55 e aos 70 dias, 25 mg dm<sup>-3</sup> de N na forma de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Aos 80 dias após a semeadura, avaliou-se a altura das plantas e procedeu-se o corte das mesmas, separando-se a parte aérea e raízes. A parte aérea de ambas as espécies, bem como as raízes, após a lavagem com água corrente e água destilada, foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 65 – 70° C até peso constante, quando foram tomados os pesos da matéria seca. Após trituração em moinho tipo Willey, as amostras foram mineralizadas (digestão nitricoperclórica) e analisadas quanto ao teor de fósforo, segundo Braga e Defelipo (1974). O fósforo acumulado em cada parte das plantas foi determinado relacionando-se os teores de fósforo e a matéria seca produzida. O fósforo total acumulado na planta foi obtido pela soma do acumulado nas raízes e na parte aérea. A porcentagem de recuperação do fósforo em cada dose aplicada foi calculada pela expressão:

$$\%P \text{ recuperado} = \frac{P \text{ total acumulado na dose} - P \text{ total acumulado na dose } 0}{P \text{ aplicado na dose}} \times 100$$

Realizaram-se análises de variância para a matéria seca da parte aérea (MSPA) e de raízes (MSRA) de ambas as espécies, altura do eucalipto e acúmulo de fósforo na MSPA (P-PA) e MSRA (P-RA), também nas duas espécies. Equações de regressão foram ajustadas para todas essas variáveis em função das doses de fósforo aplicadas.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) e das raízes (MSRA) da soja e do eucalipto, e também a altura dessa última espécie, foram influenciadas ( $P < 0,01$ ) pelos solos, níveis de densidade e doses de fósforo, havendo interação entre os fatores.

Independente das densidades dos solos e das doses de fósforo, o LV possibilitou maior produção de MSPA e MSRA de ambas as espécies, com um efeito mais pronunciado para o eucalipto; fato também verificado para a altura dessa espécie (Tabelas 2 e 3)

As doses de fósforo promoveram aumentos na MSPA e MSRA de ambas as espécies e na altura do eucalipto, embora a magnitude desses aumentos tenha variado substancialmente entre solos e suas densidades (Tabelas 2 e 3). Equações quadráticas foram as que melhor se ajustaram às variáveis de crescimento em resposta às doses de fósforo (Figuras 1, 2 e 3), exceto a altura do eucalipto no LE para o nível de densidade  $1,30 \text{ g cm}^{-3}$ , que apresentou ajuste linear (Figura 3a). A faixa de doses de fósforo utilizadas no trabalho foi suficiente para se atingir o ponto de máxima produção para a MSPA e MSRA do eucalipto, nos níveis de densidade  $1,30$  e  $1,50 \text{ g cm}^{-3}$  no LV (Figuras 2b e d). No caso da altura dessa espécie, atingiu-se o ponto de máxima em praticamente todos os níveis de densidade, com exceção do nível  $1,30 \text{ g cm}^{-3}$  no LE, cuja resposta foi linear (Figuras 3a e b).

O aumento da densidade dos solos promoveu efeito depressivo no crescimento das espécies e, proporcionalmente, foi mais pronunciado no eucalipto, principalmente no nível de densidade  $1,30 \text{ g cm}^{-3}$  no LE e  $1,70 \text{ g cm}^{-3}$  no LV.

**TABELA 2. Matéria seca da parte aérea e de raízes e relação parte aérea/raízes da soja cultivada no LE e LV em função dos níveis de densidade e doses de fósforo.**

Densidade do solo (g cm <sup>-3</sup> )	Latossolo Vermelho-Escuro (LE)					Densidade do solo (g cm <sup>-3</sup> )	Latossolo Vermelho-Amarelo (LV)				
	Doses de fósforo (mg dm <sup>-3</sup> )						Doses de fósforo (mg dm <sup>-3</sup> )				
	0	100	200	400	800		0	75	150	300	600
<b>Matéria seca da parte aérea (g vaso<sup>-1</sup>)</b>											
0,90	2,46	3,22	3,52	6,11	7,93	1,30	2,64	3,27	4,08	6,09	8,27
1,10	2,61(106) <sup>1</sup>	3,13(97)	3,13(105)	4,48(73)	7,49(94)	1,50	2,37(89)	3,18(97)	3,56(87)	5,26(86)	6,69(81)
1,30	2,56(104)	2,52(78)	2,15(61)	2,41(39)	4,00(50)	1,70	2,32(88)	2,91(89)	3,20(78)	3,95(65)	6,09(74)
<b>Matéria seca de raízes (g vaso<sup>-1</sup>)</b>											
0,90	1,06	1,10	1,16	1,80	2,09	1,30	0,86	1,09	1,43	1,68	2,18
1,10	0,96(91)	1,11(100)	1,16(100)	1,20(67)	2,02(97)	1,50	0,80(93)	0,99(91)	1,10(77)	1,20(71)	1,52(70)
1,30	0,74(70)	0,75(68)	0,62(53)	0,63(35)	1,12(54)	1,70	0,60(70)	0,90(83)	0,95(66)	1,00(60)	1,58(72)
<b>Relação parte aérea/raízes</b>											
0,90	2,32	2,93	3,03	3,39	3,79	1,30	3,07	3,00	2,85	3,62	3,79
1,10	2,72(117)	2,82(96)	3,18(105)	3,73(110)	3,71(98)	1,50	3,96(129)	3,21(107)	3,24(114)	4,38(121)	4,40(116)
1,30	3,46(149)	3,36(115)	3,47(115)	3,82(113)	3,57(94)	1,70	3,87(126)	3,23(108)	3,37(118)	3,95(109)	3,85(102)

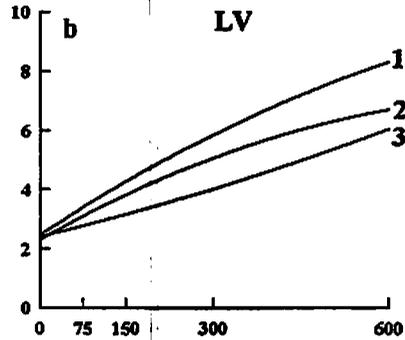
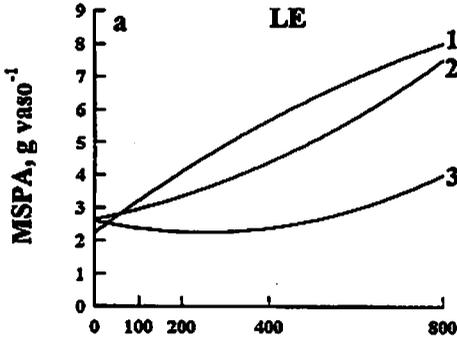
<sup>1</sup>Os números entre parênteses representam, para cada variável, dentro de cada dose de fósforo, a produção relativa dos maiores níveis de densidade em relação ao menor nível, que recebeu o valor 100.

**TABELA 3. Matéria seca da parte aérea e de raízes e relação parte aérea/raízes e altura do eucalipto cultivado no LE e LV em função dos níveis de densidade e doses de fósforo.**

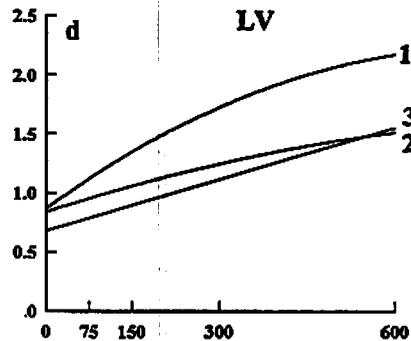
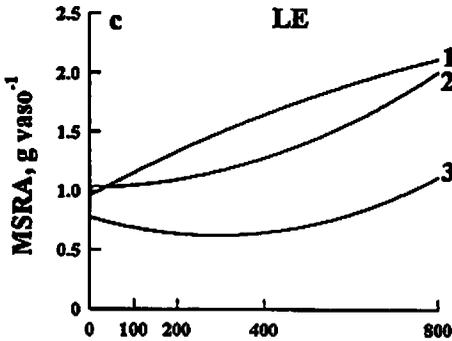
Densidade do solo (g cm <sup>-3</sup> )	Latossolo Vermelho-Escuro (LE)					Densidade do solo (g cm <sup>-3</sup> )	Latossolo Vermelho-Amarelo (LV)				
	Doses de fósforo (mg dm <sup>-3</sup> )						Doses de fósforo (mg dm <sup>-3</sup> )				
	0	100	200	400	800		0	75	150	300	600
<b>Matéria seca da parte aérea (g vaso<sup>-1</sup>)</b>											
0,90	0,06	3,62	8,86	13,82	23,47	1,30	0,17	7,74	12,93	16,47	18,78
1,10	0,05(83) <sup>1</sup>	3,76(104)	4,13(36)	11,91(86)	17,48(74)	1,50	0,11(65)	5,84(75)	8,93(69)	13,05(79)	18,52(99)
1,30	0,02(33)	0,34(9)	1,34(15)	4,56(33)	11,15(48)	1,70	0,02(12)	2,53(33)	5,50(43)	8,67(53)	12,79(68)
<b>Matéria seca de raízes (g vaso<sup>-1</sup>)</b>											
0,90	0,02	0,73	2,24	3,10	5,42	1,30	0,04	2,14	3,48	4,34	5,24
1,10	0,02(100)	0,80(110)	0,81(36)	3,12(101)	4,48(83)	1,50	0,01(25)	1,55(72)	2,49(72)	4,42(102)	4,98(95)
1,30	0,01(50)	0,05(7)	0,23(10)	0,95(31)	2,86(53)	1,70	0,01(25)	0,48(31)	1,38(40)	2,63(61)	4,09(78)
<b>Relação parte aérea/raízes</b>											
0,90	3,00	4,96	3,96	4,46	4,33	1,30	4,25	3,62	3,72	3,79	3,58
1,10	2,50(83)	4,70(95)	5,10(129)	3,82(86)	3,90(90)	1,50	11,00(159)	3,77(104)	3,59(97)	2,95(78)	3,72(104)
1,30	2,00(67)	6,80(137)	5,83(147)	4,80(108)	3,90(90)	1,70	2,00(47)	5,27(146)	3,98(107)	3,30(88)	3,13(87)
<b>Altura (cm)</b>											
0,90	3,51	18,57	31,42	31,02	35,64	1,30	4,58	25,04	31,08	30,92	32,95
1,10	2,88(83)	20,36(110)	19,13(61)	31,93(103)	31,48(88)	1,50	3,81(83)	25,21(101)	28,17(91)	30,04(97)	35,87(109)
1,30	2,44(70)	5,89(32)	9,72(31)	18,08(58)	32,24(90)	1,70	2,72(59)	15,12(60)	23,75(76)	26,12(84)	30,87(94)

<sup>1</sup>Os números entre parênteses representam, para cada variável, dentro de cada dose fósforo, a produção relativa dos maiores níveis de densidade em relação ao menor nível, que recebeu o valor 100.

1:  $Y = 2,25 + 0,00995^{**}X - 0,0000035^{**}X^2$   $R^2 = 0,97$     1:  $Y = 2,46 + 0,012^{**}X - 0,0000054^{**}X^2$   $R^2 = 0,99$   
 2:  $Y = 2,69 + 0,00362^{**}X - 0,0000029^{**}X^2$   $R^2 = 0,99$     2:  $Y = 2,77 + 0,00035^{**}X + 0,00001^{**}X^2$   $R^2 = 0,93$   
 3:  $Y = 2,61 - 0,00280^{**}X + 0,0000058^{**}X^2$   $R^2 = 0,98$     3:  $Y = 2,41 + 0,0047^{**}X + 0,000002^{**}X^2$   $R^2 = 0,99$



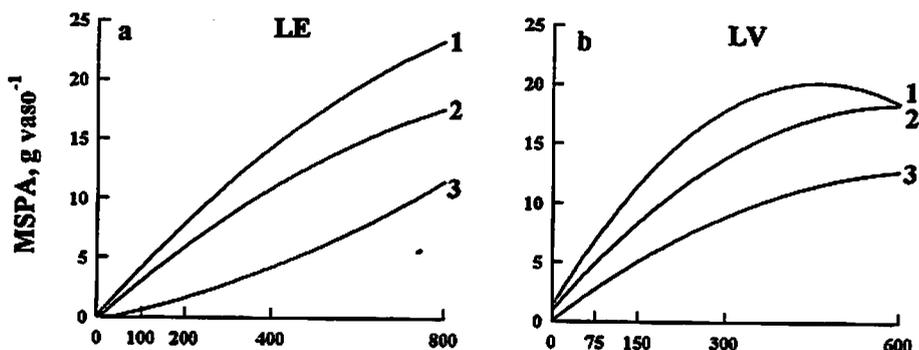
1:  $Y = 0,96 + 0,00199^{**}X - 0,0000007^{**}X^2$   $R^2 = 0,97$     1:  $Y = 0,87 + 0,0035^{**}X - 0,0000023^{**}X^2$   $R^2 = 0,99$   
 2:  $Y = 1,02 + 0,00032^{**}X + 0,0000015^{**}X^2$   $R^2 = 0,99$     2:  $Y = 0,84 + 0,0016^{**}X - 0,0000008^{**}X^2$   $R^2 = 0,98$   
 3:  $Y = 0,77 - 0,00100^{**}X + 0,0000019^{**}X^2$   $R^2 = 0,98$     3:  $Y = 0,69 + 0,0012^{**}X + 0,0000004^{**}X^2$   $R^2 = 0,95$



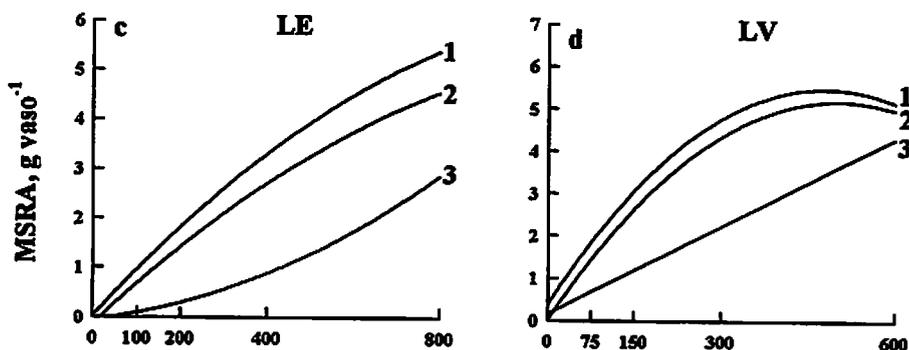
Fósforo,  $mg\ dm^{-3}$

FIGURA 1. Matéria seca da parte aérea (a e b) e das raízes (c e d) da soja cultivada no LE e LV em função dos níveis de densidade (LE: 1=0,90, 2=1,10 e 3=1,30  $g\ cm^{-3}$ ; LV: 1=1,30, 2=1,50 e 3=1,70  $g\ cm^{-3}$ ) e doses de fósforo (\*\* e \* significativos a 1 e 5% pelo teste de t).

1: $Y = 0,09 + 0,04206^{**}X - 0,000002^{**}X^2$	$R^2 = 0,99$	1: $Y = 1,24 + 0,08204^{**}X - 0,00009^{**}X^2$	$R^2 = 0,99$
2: $Y = 0,14 + 0,03293^{**}X - 0,00001^{**}X^2$	$R^2 = 0,98$	2: $Y = 0,90 + 0,05709^{**}X - 0,00005^{**}X^2$	$R^2 = 0,99$
3: $Y = 0,28 + 0,0079^{**}X + 0,000008^{**}X^2$	$R^2 = 0,99$	3: $Y = 0,04 + 0,0378^{**}X - 0,00003^{**}X^2$	$R^2 = 0,99$



1: $Y = 0,03 + 0,0096^{**}X - 0,00004^{**}X^2$	$R^2 = 0,94$	1: $Y = 0,38 + 0,02129^{**}X - 0,00002^{**}X^2$	$R^2 = 0,97$
2: $Y = -0,13 + 0,0084^{**}X - 0,000003^{**}X^2$	$R^2 = 0,96$	2: $Y = 0,02 + 0,02053^{**}X - 0,00002^{**}X^2$	$R^2 = 0,99$
3: $Y = 0,04 + 0,00097^{**}X + 0,000003^{**}X^2$	$R^2 = 0,99$	3: $Y = -0,11 + 0,01075^{**}X - 0,000006^{**}X^2$	$R^2 = 0,99$



Fósforo, mg dm<sup>3</sup>

FIGURA 2. Matéria seca da parte aérea (a e b) e das raízes (c e d) do eucalipto cultivado no LE e LV em função dos níveis de densidade (LE: 1=0,90, 2=1,10 e 3=1,30 g cm<sup>-3</sup>; LV: 1=1,30, 2=1,50 e 3=1,70 g cm<sup>-3</sup>) e doses de fósforo (\*\* significativo a 1% pelo teste de t).

1: $Y = 6,78 + 0,11224^{**}X - 0,00010^{**}X^2$	$R^2 = 0,89$	1: $Y = 9,81 + 0,14065^{**}X - 0,00017^{**}X^2$	$R^2 = 0,81$
2: $Y = 5,44 + 0,10064^{**}X - 0,00009^{**}X^2$	$R^2 = 0,91$	2: $Y = 9,39 + 0,12857^{**}X - 0,00014^{**}X^2$	$R^2 = 0,81$
3: $Y = 2,39 + 0,03761^{**}X$	$R^2 = 0,99$	3: $Y = 5,14 + 0,12036^{**}X - 0,00013^{**}X^2$	$R^2 = 0,93$

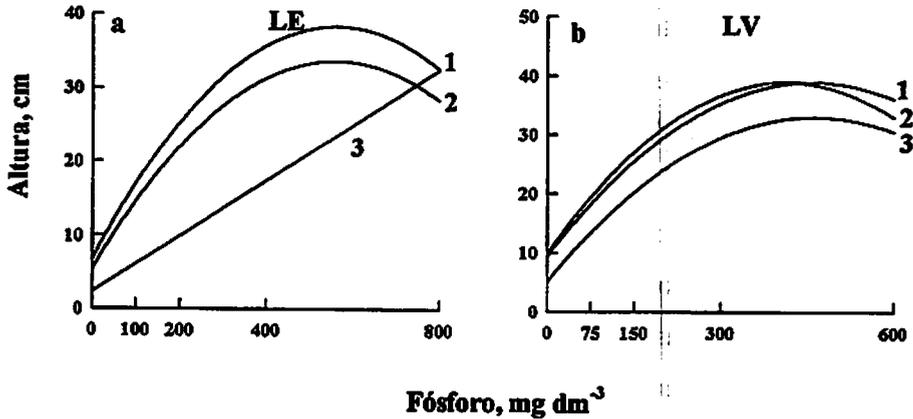


FIGURA 3. Altura do eucalipto cultivado no LE (a) e LV (b) em função dos níveis de densidade (LE: 1=0,90, 2=1,10 e 3=1,30 g cm<sup>-3</sup>; LV: 1=1,30, 2=1,50 e 3=1,70 g cm<sup>-3</sup>) e doses de fósforo (\*\* significativos a 1% pelo teste de t).

Além da diminuição do crescimento, a compactação dos solos reduziu a magnitude de resposta das espécies às doses de fósforo, o que pode ser observado pela inclinação das curvas das Figuras 1, 2 e 3. Como exemplo desse fato, considerando-se como máxima a produção de MSPA da soja no LE no nível de densidade 3 (1,30 g cm<sup>-3</sup>), aquela obtida na dose de 800 mg dm<sup>-3</sup> de fósforo (Figura 1a), essa mesma produção de MSPA é obtida com a aplicação de apenas 185 e 295 mg dm<sup>-3</sup> de fósforo, para os níveis de densidade 1 (0,90 g cm<sup>-3</sup>) e 2 (1,10 g cm<sup>-3</sup>), respectivamente. Da mesma maneira para o eucalipto, a mesma produção de MSPA é obtida no LE (Figura 2a) pela aplicação das doses de 330, 415 e 800 mg dm<sup>-3</sup> de fósforo, quando se variam as densidades do solo de 0,90; 1,10 e 1,30 g cm<sup>-3</sup>, respectivamente. Efeitos semelhantes podem ser observados para todas as variáveis de crescimento estudadas, em ambos os solos

e espécies. Assim, o aumento da densidade dos solos, além de reduzir o crescimento das plantas, reduziu também, drasticamente, a eficiência da adubação fosfatada.

A relação parte aérea/raízes (PA/RA) indica em qual parte da planta os fatores estudados exerceram maior efeito na produção de massa seca das espécies. Embora não houvesse uma tendência bem definida dentro das doses de fósforo aplicadas, de maneira geral, o aumento da densidade, proporcionalmente, reduziu mais a massa seca de raízes do que da parte aérea da soja em ambos os solos; para o eucalipto, os valores observados foram bastante inconsistentes (Tabelas 2 e 3).

O fósforo acumulado na parte aérea (P-PA) e nas raízes (P-RA) das espécies foi influenciado ( $P < 0,01$ ) pelos solos, densidades dos solos e doses de fósforo, havendo interação entre os fatores.

De maneira geral, os efeitos dos fatores estudados sobre o acúmulo de fósforo nas espécies seguiram o mesmo comportamento daqueles observados para a produção de matéria seca das plantas, isto devido à relação direta entre as duas variáveis.

As quantidades de fósforo acumuladas na parte aérea, nas raízes e total (parte aérea + raízes) pela soja (Tabela 4) e pelo eucalipto (Tabela 5) aumentaram com as doses de fósforo aplicadas, embora a magnitude desses aumentos tenha variado substancialmente entre as espécies, solos e suas densidades. Para a soja, o acúmulo de fósforo em função de suas doses seguiu, para todas os níveis de densidade, em ambos os solos, um comportamento quadrático, sem atingir um ponto de máximo dentro da faixa de doses estudadas (Figura 4); para o eucalipto, esse comportamento foi linear (Figura 5).

TABELA 4. Fósforo acumulado na parte aérea, nas raízes e total da soja cultivada no LE e LV em função dos níveis de densidade e doses de fósforo.

Densidade do solo (g cm <sup>-3</sup> )	Latossolo Vermelho-Escuro (LE)					Densidade do solo (g cm <sup>-3</sup> )	Latossolo-Vermelho Amarelo (LV)				
	Doses de fósforo (mg dm <sup>-3</sup> )						Doses de fósforo (mg dm <sup>-3</sup> )				
	0	100	200	400	800		0	75	150	300	600
Fósforo acumulado na parte aérea (mg vaso <sup>-1</sup> )											
0,90	1,80	3,35	4,85	8,84	18,51	1,30	1,93	3,34	5,95	16,46	36,51
1,10	2,26(126) <sup>1</sup>	3,85(115)	4,15(86)	6,02(68)	14,31(77)	1,50	2,04(106)	3,04(91)	4,64(78)	11,17(68)	27,34(75)
1,30	2,17(121)	2,42(70)	2,47(51)	2,98(34)	5,16(28)	1,70	2,00(104)	2,99(90)	4,11(69)	8,05(49)	20,70(57)
Fósforo acumulado nas raízes (mg vaso <sup>-1</sup> )											
0,90	1,02	1,29	0,93	2,14	3,87	1,30	0,79	1,51	1,87	5,03	15,50
1,10	0,66(65)	0,99(77)	1,06(114)	1,65(77)	3,66(95)	1,50	0,68(86)	0,99(66)	1,04(56)	1,66(33)	6,80(44)
1,30	0,51(50)	0,78(60)	0,66(71)	0,63(29)	1,30(34)	1,70	0,58(73)	1,02(68)	1,19(64)	2,09(42)	5,54(36)
Fósforo total acumulado na planta (mg vaso <sup>-1</sup> )											
0,90	2,82	4,64	5,78	10,98	22,38	1,30	2,72	4,85	7,82	21,49	52,01
1,10	2,92(103)	4,84(104)	5,21(90)	7,67(70)	17,97(80)	1,50	2,72(100)	4,03(83)	5,68(73)	12,83(60)	34,14(66)
1,30	2,68(95)	3,20(69)	3,13(54)	3,61(33)	6,46(29)	1,70	2,58(95)	4,01(83)	5,30(68)	10,14(47)	26,24(50)

<sup>1</sup>Os números entre parênteses representam, para cada variável, dentro de cada dose de fósforo, o acúmulo relativo de fósforo nos maiores níveis de densidade em relação ao menor nível, que recebeu o valor 100.

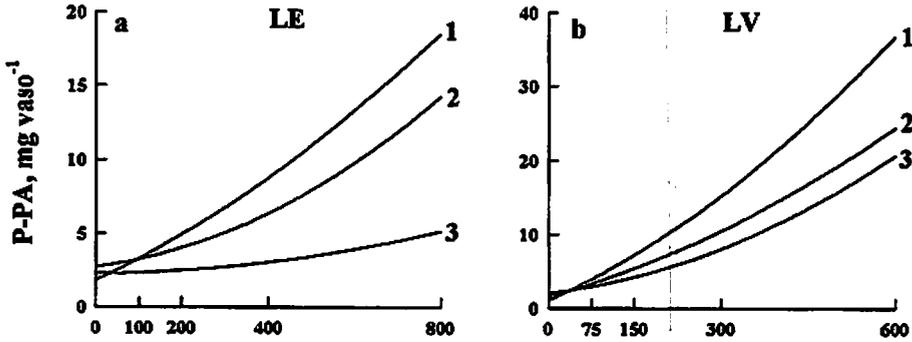
**TABELA 5. Fósforo acumulado na parte aérea, nas raízes e total do eucalipto cultivado no LE e LV em função dos níveis de densidade e doses de fósforo.**

Densidade Do solo (g cm <sup>-3</sup> )	Latossolo Vermelho-Escuro (LE)					Densidade do solo (g cm <sup>-3</sup> )	Latossolo Vermelho-Amarelo (LV)				
	Doses de fósforo (mg dm <sup>-3</sup> )						Doses de fósforo (mg dm <sup>-3</sup> )				
	0	100	200	400	800		0	75	150	300	600
<b>Fósforo acumulado na parte aérea (mg vaso<sup>-1</sup>)</b>											
0,90	0,13	10,28	19,26	26,51	48,84	1,30	0,31	13,35	21,43	39,11	62,75
1,10	0,08(62) <sup>1</sup>	9,02(88)	11,59(60)	24,65(93)	33,35(68)	1,50	0,22(71)	11,30(85)	14,68(69)	37,14(95)	90,72(145)
1,30	0,04(31)	0,92(9)	3,17(16)	14,70(55)	27,55(56)	1,70	0,04(13)	5,40(40)	9,78(46)	29,55(76)	74,26(118)
<b>Fósforo acumulado nas raízes (mg vaso<sup>-1</sup>)</b>											
0,90	0,02	1,41	3,63	5,48	11,95	1,30	0,05	3,09	5,44	11,06	18,83
1,10	0,04(200)	1,34(95)	1,39(38)	4,25(78)	4,50(38)	1,50	0,02(40)	2,13(69)	3,47(64)	8,51(77)	11,88(63)
1,30	0,02(100)	0,08(6)	0,33(9)	1,50(27)	4,65(39)	1,70	0,01(29)	0,84(27)	2,13(39)	4,93(45)	9,05(48)
<b>Fósforo total acumulado na planta (mg vaso<sup>-1</sup>)</b>											
0,90	0,15	11,69	22,89	31,99	60,79	1,30	0,36	16,44	26,87	50,17	81,58
1,10	0,12(80)	10,36(89)	12,98(57)	28,90(90)	37,85(62)	1,50	0,24(67)	13,43(82)	18,15(68)	45,65(91)	102,60(126)
1,30	0,06(40)	1,00(9)	3,50(15)	16,20(51)	32,20(53)	1,70	0,05(14)	6,24(38)	11,91(44)	34,48(69)	83,31(102)

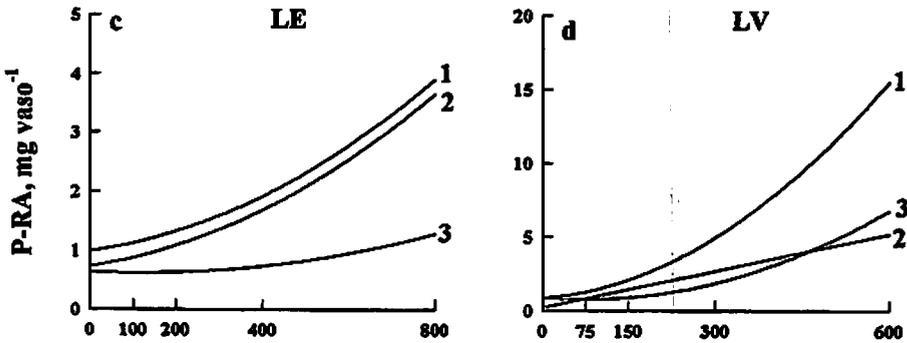
<sup>1</sup>Os números entre parênteses representam, para cada variável, dentro de cada dose de fósforo, o acúmulo relativo de fósforo nos maiores níveis de densidade em relação ao menor nível, que recebeu o valor 100.



1:  $Y = 1,80 + 0,01405^{**}X - 0,0000086^{**}X^2$   $R^2 = 0,99$     1:  $Y = 1,06 + 0,0351^{**}X + 0,00004^{**}X^2$   $R^2 = 0,99$   
 2:  $Y = 2,71 + 0,0039^{**}X + 0,000013^{**}X^2$   $R^2 = 0,99$     2:  $Y = 1,71 + 0,168^{**}X + 0,00004^{**}X^2$   $R^2 = 0,99$   
 3:  $Y = 2,24 + 0,0003^{**}X + 0,0000019^{**}X^2$   $R^2 = 0,99$     3:  $Y = 2,03 + 0,0088^{**}X - 0,00004^{**}X^2$   $R^2 = 0,99$



1:  $Y = 0,98 + 0,0010^{**}X + 0,0000033^{**}X^2$   $R^2 = 0,96$     1:  $Y = 0,86 + 0,0029^{**}X + 0,00004^{**}X^2$   $R^2 = 0,99$   
 2:  $Y = 0,73 + 0,0011^{**}X + 0,0000032^{**}X^2$   $R^2 = 0,99$     2:  $Y = 0,88 - 0,0032^{**}X + 0,00002^{**}X^2$   $R^2 = 0,99$   
 3:  $Y = 0,63 - 0,00032^{**}X + 0,0000014^{**}X^2$   $R^2 = 0,97$     3:  $Y = 0,68 + 0,0018^{**}X - 0,00001^{**}X^2$   $R^2 = 0,99$



Fósforo,  $mg\ dm^{-3}$

FIGURA 4. Fósforo acumulado na parte aérea (a e b) e nas raízes (c e d) da soja cultivada no LE e LV em função dos níveis de densidade (LE: 1=0,90, 2=1,10 e 3=1,30  $g\ cm^{-3}$ ; LV: 1=1,30, 2=1,50 e 3=1,70  $g\ cm^{-3}$ ) e doses de fósforo (\*\* significativo a 1% pelo teste de t).

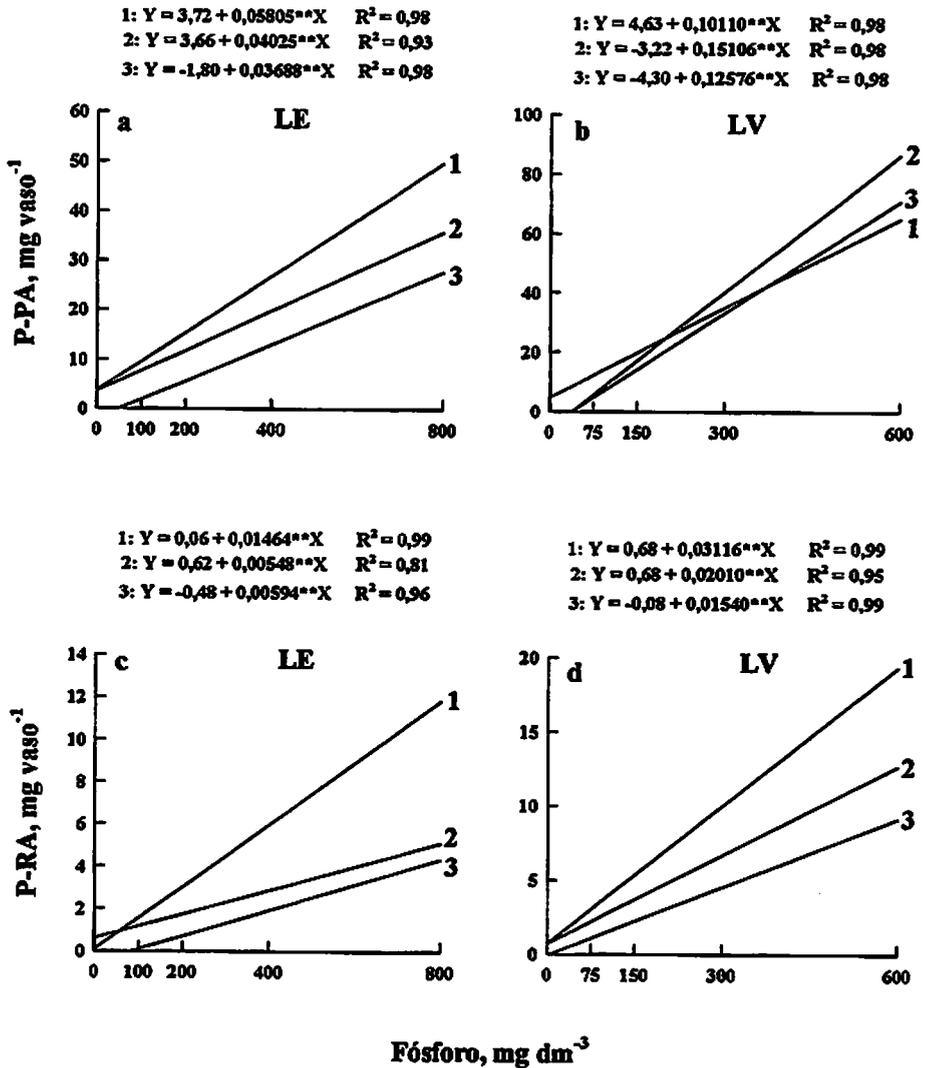


FIGURA 5. Fósforo acumulado na parte aérea (a e b) e nas raízes (c e d) do eucalipto cultivado no LE e LV em função dos níveis de densidade (LE: 1=0,90, 2=1,10 e 3=1,30 g cm<sup>-3</sup>; LV: 1=1,30, 2=1,50 e 3=1,70 g cm<sup>-3</sup>) e doses de fósforo (\*\* significativo a 1% pelo teste de t).

O aumento da densidade dos solos reduziu o acúmulo de fósforo na matéria seca das espécies em ambos os solos e esse efeito, proporcionalmente, foi maior para o eucalipto cultivado no LE (Tabelas 4 e 5 e Figuras 4 e 5). Exemplo da restrição da aquisição do fósforo pelas plantas devido ao aumento da densidade do solo pode ser dado pelo acúmulo de fósforo na MSPA da soja cultivada no LE: o mesmo acúmulo observado no nível 3 ( $1,30 \text{ g cm}^{-3}$ ) de densidade, com a aplicação de  $800 \text{ mg dm}^{-3}$  de fósforo, pode ser obtido nos níveis de densidade 1 ( $0,90 \text{ g cm}^{-3}$ ) e 2 ( $1,10 \text{ g cm}^{-3}$ ) com a aplicação de apenas 205 e  $300 \text{ mg dm}^{-3}$  de fósforo, respectivamente (Figura 4a).

Assim, o aumento da densidade, reduzindo a absorção e acumulação de fósforo, diminui também a recuperação pelas plantas do fósforo aplicado (Tabela 6). De maneira geral, a recuperação do fósforo foi baixa, situando-se em valores inferiores a 13,5%. O eucalipto mostrou-se mais eficiente do que a soja nessa recuperação, sendo que os maiores valores foram observados para o solo LV. Esse fato pode ser justificado pela maior produção de MSRA pelo eucalipto, possivelmente com maior exploração do volume do solo, criando uma situação de maior demanda do nutriente. As maiores inclinações das curvas e retas observadas para o solo LV em relação ao LE (Figuras 4 e 5) mostram que ambas as espécies acumularam maiores quantidades de fósforo por unidade do nutriente aplicado, o que levou a um maior aproveitamento do fósforo aplicado no primeiro solo.

TABELA 6. Recuperação de fósforo pela soja e eucalipto cultivados no LE e LV em função dos níveis de densidade e doses de fósforo.

Densidade do solo (g cm <sup>-3</sup> )	Latossolo Vermelho-Escuro (LE)				Média	Densidade do solo (g cm <sup>-3</sup> )	Latossolo Vermelho-Amarelo (LV)				Média
	Doses de fósforo (mg dm <sup>-3</sup> )						Doses de fósforo (mg dm <sup>-3</sup> )				
	100	200	400	800		75	150	300	600		
-----%-----											
Soja											
0,90	1,14	0,92	1,27	1,53	1,21	1,30	1,77	2,12	3,91	5,13	3,23
1,10	1,20(105) <sup>1</sup>	0,72(78)	0,74(58)	1,18(77)	0,96(79)	1,50	1,09(62)	1,23(58)	2,11(54)	3,27(64)	1,92(59)
1,30	0,32(28)	0,14(15)	0,15(12)	0,30(20)	0,91(75)	1,70	1,19(67)	1,13(53)	1,58(40)	2,46(48)	1,59(49)
Média					1,03	Média					2,24
Eucalipto											
0,90	7,21	7,11	4,97	4,74	6,00	1,30	13,40	11,05	10,38	8,46	10,82
1,10	6,40(89)	4,02(56)	4,50(90)	2,95(62)	4,47(74)	1,50	10,99(82)	7,46(68)	9,46(91)	10,66(126)	9,64(89)
1,30	0,59(8)	1,07(15)	2,52(51)	2,51(53)	1,67(28)	1,70	5,16(38)	4,94(45)	7,17(69)	8,67(102)	6,48(60)
Média					4,04	Média					8,98

<sup>1</sup>Os números entre parênteses representam, para cada variável, dentro de cada dose e média das doses de fósforo, a recuperação relativa de fósforo nos maiores níveis de densidade em relação ao menor nível, que recebeu o valor 100.

Em camadas de maior densidade, há uma modificação profunda nas características físicas do solo, e desse modo o crescimento das raízes pode ser prejudicado (Vepraskas e Wagger, 1990). As raízes sofrem uma série de modificações morfológicas (grossas, curtas, tortuosas) e fisiológicas (hidratação, maior taxa de respiração), com reflexo direto no crescimento da planta (Grable, 1966). Alvarenga et al. (1996) mostraram, em um Latossolo Vermelho-Amarelo muito argiloso, que com o aumento da densidade, houve decréscimos na porosidade total e na macroporosidade das amostras e acréscimos na microporosidade e na resistência do solo à penetração de raízes. Assim, o aumento da densidade do solo promoveu uma redução na densidade e no comprimento de raízes de leguminosas, com diferenças significativas entre as espécies estudadas. Meredith e Patrick Jr. (1961) destacam a importância dos macroporos na penetração de raízes e salientam que os mesmos são extremamente sensíveis ao aumento da densidade do solo e que em altos níveis de densidade, quase todos os poros não capilares são destruídos.

A resistência do solo é outra característica limitante à penetração de raízes. Nesse sentido, Gill e Bolt (1955) observaram que o crescimento de raízes em solos com densidades elevadas é condicionado pelo balanço entre a resistência oferecida pelo solo e a pressão exercida pelas raízes. Borges (1986) trabalhando com um Latossolo Vermelho-Escuro muito argiloso, submetido a cinco níveis de densidade, variando de  $0,85 \text{ g cm}^{-3}$  (natural) até  $1,35 \text{ g cm}^{-3}$ , observou, para diferentes cultivares de soja e espécies de eucalipto, que a densidade de  $1,25 \text{ g cm}^{-3}$  na camada subsuperficial do solo foi extremamente limitante ao crescimento radicular. O autor comenta que nesse nível de densidade, as amostras do solo apresentavam-se duras e resistentes a rupturas, mesmo em condições de maior umidade. Assim, concluiu que a resistência mecânica foi o fator limitante mais importante da elongação das raízes no solo compactado.

Os dados obtidos no presente trabalho (Tabelas 2 e 3) concordam com os observados por Borges (1986), em que o aumento da densidade do solo afetou, proporcionalmente, mais o crescimento radicular do eucalipto do que da soja, justificando esse comportamento às diferenças genéticas inerentes a cada espécie, principalmente relacionadas aos seus aspectos morfológicos. Embora ambas as espécies apresentem sistema radicular pivotante, as raízes da soja são mais finas e com grande capacidade de ramificação lateral, enquanto o eucalipto possui raízes com maior diâmetro e com poucas ramificações em profundidade, o que dificulta a penetração nos poros pequenos e rígidos das camadas de maior densidade. Forristal e Gessel (1955) também fazem referência à maior sensibilidade das árvores, em relação às culturas anuais, ao aumento da densidade do solo.

A redução da macroporosidade pelo aumento da densidade exerce, também, grande efeito sobre o desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, das plantas, por imprimir ao solo condições de baixa aeração, induzindo uma possível deficiência de oxigênio e formação de um ambiente redutor. Borges et al. (1988) demonstraram que em densidades iguais ou superiores a  $1,25 \text{ g cm}^{-3}$ , em um LE muito argiloso, além do pequeno crescimento, as raízes de cultivares de soja apresentavam-se curtas, grossas e escamosas e que, de acordo com Baligar et al. (1975), essas alterações morfológicas são características de raízes desenvolvidas em ambiente redutor e pobre em oxigênio. Segundo esses autores, essas condições promovem, também, maior lignificação dos vasos condutores do xilema e do floema, bem como dos tecidos parenquimatosos, estruturas da planta envolvidas na absorção e transporte de íons pelas raízes; o que concorda com o relato de Leonard e John (1944), de que baixas concentrações de oxigênio e o ambiente redutor nas camadas de alta densidade causam diminuição do poder de absorção ativa das raízes. Contudo, Phillips e Kirkhan (1962) e Rosemberg e Willits (1962) afirmam que a importância da aeração está mais relacionada com

solos argilosos, não havendo, em geral, efeito de densidades maiores na aeração de solos de textura média e grosseira. Esse fato concorda com os resultados observados no presente trabalho, em que se observa que o solo LV, de textura franco arenosa (Tabela 1), com densidades de estudo bem superiores ao LE, apresentou com o aumento da densidade, menores restrições ao crescimento e ao aproveitamento pelas plantas do fósforo aplicado ao solo.

A redução da resposta da soja e do eucalipto à adubação fosfatada com o aumento da densidade nos dois solos (Figuras 1, 2 e 3) é claramente explicada por Novais e Smyth (1999). Os autores relatam que o aumento da densidade do solo, aumentando a participação de microporos, aumenta a energia de retenção e a viscosidade da água, a interação dos íons fosfato e a superfície dos colóides, facilitando a adsorção. Portanto, o aumento da densidade do solo concorre para uma maior adsorção do fósforo em detrimento do seu fluxo difusivo em direção às raízes. Assim, para que haja um contato fosfato-raiz satisfatório, doses de fósforo cada vez maiores deverão ser aplicadas, aumentando a saturação dos pontos de adsorção, o que possibilitaria a manutenção de um fluxo difusivo em níveis razoáveis, atendendo às exigências das plantas. Desse modo, os solos com maiores densidades tornam-se menos responsivos a aplicações de fósforo, principalmente pela diminuição drástica do seu fluxo difusivo, particularmente nos solos mais argilosos, com maior capacidade de adsorção de fosfato. Esses fatos explicam, além da menor resposta em crescimento das espécies estudadas às doses de fósforo, também a redução da acumulação (Tabelas 4 e 5) e da recuperação do fósforo aplicado (Tabela 6), principalmente no LE, solo com maior teor de argila. De acordo com Muniz et al. (1985), a taxa de recuperação por plantas de soja do fósforo aplicado correlacionou-se inversamente com a capacidade-tampão de fósforo dos solos, ou seja, para a mesma quantidade absorvida, será necessária maior quantidade de fósforo em solo com maior capacidade-tampão, como observado no mais argiloso (LE).

## 4 CONCLUSÕES

O aumento da densidade dos solos reduziu o crescimento das espécies estudadas, cujo efeito foi mais pronunciado no Latossolo Vermelho-Escuro do que no Latossolo Vermelho-Amarelo, sendo o eucalipto mais afetado do que a soja;

O aumento da densidade dos solos reduziu a eficiência da adubação fosfatada, mostrando-se o eucalipto mais eficiente na recuperação do fósforo aplicado aos solos do que a soja.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARENGA, R.C.; COSTA, L.M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A.J. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.20, n.2, p.319-326, maio/ago., 1996.
- BALIGAR, V.C.; NASH, V.E.; HARE, M.L.; PRICE JR., J.A. Soybean root anatomy as influenced by soil bulk density. *Agronomy Journal*, Madison, v.67, p.842-844, 1975.
- BORGES, E.N. Resposta da soja e do eucalipto a camadas compactadas de solo. Viçosa: UFV, 1986. 74p. (Dissertação – Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)
- 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. *Revista Ceres*, Viçosa, v.35, p.553-568, 1988.
- BRAGA, J.M.; DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extrato de solos e plantas. *Revista Ceres*, Viçosa, v.21, p.73-85, 1974.
- CARVALHO JÚNIOR, I.A.C. Estimativas de parâmetros sedimentológicos para estudo de camadas compactadas e/ou adensadas em latossolo de textura média, sob diferentes usos. Viçosa: UFV, 1995. 83p. (Dissertação – Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)

- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e conservação de solos. **Manual de métodos de análises de solos.** Rio de Janeiro, 1979. n.p.
- FERNANDES, B. **Retenção e movimento de água no solo.** Viçosa: UFV, 1967. 48p. (Dissertação – Mestrado em Fitotecnia).
- FORRISTAL, F.F.; GESSEL, J.P. Soil properties related to forest cover type and productivity on the three forest. *Soil Science Society American Proc.*, v.19, p.384-389, 1955.
- FREIRE, J.C.; RIBEIRO, M.A.V.; BAHIA, V.G.; LOPES, A.S.; AQUINO, L.H. de. Resposta do milho cultivado em casa de vegetação a níveis de água em solos da região de Lavras (MG). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.4, n.1, p.4-8, jan./abr., 1980.
- GILL, W.R.; BOLT, G.H. Pfeffer's studies of root growth pressure exerted by plants. *Agronomy Journal*, Madison, v.47, p.166-168, 1955.
- GRABLE, A.R. Soil aeration and plant growth. *Adv. Agron.*, v.18, p.57-106, 1966.
- LEONARD, P.P.; JOHN, W.S. The importance of oxygen in the nutrient substrate for plants ion absorption. *Soil Science*, Baltimore, v.57, p.143-154, 1944.
- LOPES, A.S. **Solos sob "cerrado": características, propriedades e manejo.** Piracicaba: POTAFOS, 1983. 162p.
- MANTOVANI, E.V. Compactação do solo, máquinas e implementos agrícolas. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v.13, n.147, p.17-32, 1987.
- MEREDITH, H.L.; PATRICK JR., W.H. Effects of soil compaction on subsoil root penetration and physical properties fo three soil in Lowisiana. *Agronomy Journal*, Madison, v.53, p.163-167, 1961.
- MUNIZ, A.S.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F., NEVES, J.C.L. Nível crítico de fósforo na parte aérea da soja como variável do fator capacidade de fósforo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.9, n.3, p.237-243, set./dez., 1985.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e plantas em condições tropicais.** Viçosa: UFV/DPS, 1999. 399p.

- PHILLIPS, R.E.; KIRKHAN, A. Mechanical impedance and corn seedlings root growth. *Soil Science Society American Proceedings*, v.26, p.319-322, 1962.
- RESENDE, M. *Pedologia*. Viçosa: UFV, 1982. 100p. (Boletim de extensão, 142).
- ROSA JÚNIOR, E.J. Efeito de sistemas de manejo e tempo de uso sobre características físicas e químicas de dois solos de Ponta Grossa.. Viçosa: UFV, 1984. 89p. (Dissertação – Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)
- ROSEMBERG, N.J.; WILLITS, N.A. Yield and physiological response of barbey and beans grown in artificially compacted soils. *Soil Science Society American Proc.*, v.26, p.78-82, 1962.
- SUMNER, M.E. Uso atual do gesso no mundo em solos ácidos. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2, 1992, Uberaba, MG. *Anais...* Brasília: Nagy, 1992. p.7-40.
- VEPRASKAS, M.J.; WAGGER, M.G. Corn root distribution and yield response to subsoiling for Palendulte having different aggregate sizes. *Soil Science Society American Journal*, Madison, v.54, p.849-854, 1990.
- WILD, A. Mass flow and diffusion. In: GREENLAND, D.J.; HAYES, M.H.B (ed.). *The chemistry of soil processes*. Chichester: John Wiley, 1981. p.37-80.

## CAPÍTULO 3

### NÍVEIS DE DENSIDADE, DE UMIDADE E FÓSFORO NO CRESCIMENTO DA SOJA E DO EUCALIPTO

#### RESUMO

Estudou-se o efeito de níveis de densidade, de umidade e fósforo no crescimento da soja e do eucalipto, em amostras de dois latossolos, em casa-de-vegetação, utilizando-se a técnica de raízes subdividas, em vasos com  $2,4 \text{ dm}^3$  de volume. Um dos compartimentos de cada vaso continha os tratamentos, que foram dois solos (Latossolo Vermelho-Escuro textura muito argilosa - LE e Latossolo Vermelho-Amarelo textura franco arenosa - LV), dois níveis de densidade ( $0,90$  e  $1,20 \text{ g cm}^{-3}$  no LE e  $1,30$  e  $1,70 \text{ g cm}^{-3}$  no LV), uma dose única de fósforo ( $400 \text{ mg dm}^{-3}$  no LE e  $300 \text{ mg dm}^{-3}$  no LV) e quatro níveis de umidade dos solos, aplicados no final da fase experimental, em função dos tempos de coleta de dados. O outro compartimento de cada vaso continha solução nutritiva sem fósforo, comum a todos os tratamentos. O aumento da densidade dos solos mostrou-se prejudicial ao crescimento das plantas, sendo o efeito mais acentuado no LE do que no LV. O fornecimento de fósforo somente no solo não prejudicou o desenvolvimento das raízes das plantas na solução nutritiva, sem a presença desse nutriente. O aumento da densidade dos solos promoveu uma redução no volume de exsudato xilemático das plantas e a concentração de fósforo no exsudato xilemático de ambas as espécies diminuiu com a redução da umidade dos solos.

## CHAPTER 3

### GROWTH OF SOYBEANS AND EUCALYPTUS AS AFFECTED BY SOIL DENSITY, SOIL HUMIDITY, AND PHOSPHORUS DOSES

#### ABSTRACT

A greenhouse experiment using the technique of subdivided roots (split pots with two compartments of 2.4 dm<sup>3</sup> each) was conducted at the Soil Science Department of Federal University of Viçosa using two Oxisols (Latosols) with different texture in order to evaluate the effect of soil density, phosphorus (P) doses, and soil humidity in the growth of soybeans and eucalyptus. One of the compartments contained the following treatments: two Oxisols (a clayey Dark-Red Latosol - DR and a sandy-loam Yellow-Red Latosol - YR), two soil densities (0.90 and 1.20 g cm<sup>-3</sup> in the DR soil and 1.30 and 1.70 g cm<sup>-3</sup> in the YR soil), one P dose (400 mg dm<sup>-3</sup> in the DR soil and 300 mg dm<sup>-3</sup> in the YR soil), and four levels of soil humidity applied at the end of the experiment according to the data collecting time. The other compartment held a nutrient solution without P, common to all treatments. Increasing soil density decreased the growth of both species, and this effect was more harmful to the growth of the plants in the DR than in the YR soil. The supply of phosphorus only via soil did not impair the root development in the nutrient solution with no added P. Increasing soil density decreased the volume of plant xylematic exudates. In addition, the P concentration in the xylematic exudate of both species decreased as soil humidity decreased.

## 1 INTRODUÇÃO

O adequado crescimento e desenvolvimento das plantas, que levam a produzir grãos, fibras e outros produtos comerciáveis, depende da existência de balanço ideal de uma série de fatores. A absorção de nutrientes é um dos fatores mais importantes para que se obtenham boas produções, pode ser reduzida em função de qualquer obstáculo que restrinja o crescimento radicular.

Esforços têm sido dedicados à melhoria tecnológica dos processos de produção agrícola, principalmente com relação à recomendação e aplicação de fertilizantes, mecanização e escolha dos sistemas de produção. Nos últimos 25 a 30 anos, efeitos secundários no ambiente, como poluição industrial e degradação dos solos usados para agricultura, cuja compactação é um ponto fundamental, passaram a ser discutidos e estudados com maior ênfase (Camargo e Alleoni, 1997).

Diversos fatores ocasionam crescimento deficiente do sistema radicular de plantas cultivadas, dentre os quais: danos causados por insetos e moléstias, deficiências nutricionais, acidez do solo, drenagem insuficiente, baixa taxa de oxigênio, temperatura inadequada e aumento da densidade do solo. Dentre essas limitações, o aumento da densidade do solo toma, muitas vezes, dimensões sérias, pois ao causar restrições ao crescimento e desenvolvimento radiculares, acarreta uma série de problemas que afetam direta e indiretamente a produção das plantas.

A agricultura intensiva, na qual o número de máquinas que trafegam em uma área é grande e o cultivo é feito muito mais à base de um planejamento temporal do que visando a conservação dos recursos edáficos, o problema do aumento da densidade do solo vem aparecendo sistematicamente em extensas regiões do país, mostrando seus efeitos comprometedores à boa produtividade agrícola. Este problema influencia as relações entre ar, água e temperatura,

afetando a brotação e a emergência das plantas, o crescimento radicular, e praticamente todas as fases de seu desenvolvimento e crescimento.

O tráfego de máquinas e implementos, principalmente quando efetuado em determinadas condições de umidade, provoca alterações no arranjo das partículas do solo, na região ocupada pelas raízes (rizosfera), diminuindo o volume ocupado por determinada massa de terra e o tamanho dos poros do solo que permitem livre circulação de ar e água – os macroporos. Conseqüentemente, outros atributos físicos do solo – aeração, temperatura e resistência mecânica à penetração de raízes, são modificados, afetando também atributos químicos (disponibilidade dos nutrientes para as plantas) e biológicos (condições do solo para desenvolvimento de microrganismos). Portanto, a compactação é dos principais fatores limitantes ao crescimento radicular das plantas cultivadas.

Os íons dissolvidos na solução do solo são transportados, fundamentalmente, por fluxo de massa e difusão. O fósforo é incluído entre os nutrientes que se deslocam nesse meio quase que exclusivamente por difusão, ficando clara a importância da existência de um adequado suprimento de água aos solos para ocorrer absorção de fósforo em níveis satisfatórios.

O objetivo desse trabalho foi avaliar os efeitos de níveis de densidade e de umidade de dois latossolos de diferentes texturas, no crescimento e sobre o volume, concentração e conteúdo de fósforo no exsudato xilemático da soja e do eucalipto.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

Em dois experimentos realizados em casa de vegetação do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa (MG), um com soja [*Glycine max* (L.) Merrill variedade Tropical] e o outro com eucalipto

*Eucalyptus grandis*), utilizaram-se amostras da camada superficial (0 – 20 cm) de dois latossolos (LE e LV) já caracterizados química e fisicamente na Tabela 1 do Capítulo 2.

Utilizou-se a técnica de raízes subdivididas em vasos geminados com capacidade de 2,6 dm<sup>3</sup> cada unidade, sendo que um recebeu 2,4 dm<sup>3</sup> de cada solo, os quais receberam adubação com fósforo (LE = 400 mg dm<sup>-3</sup> e LV = 300 mg dm<sup>-3</sup>) e o outro, o mesmo volume (2,4 dm<sup>3</sup>) da solução nutritiva de Clark (Clark, 1975), modificada quanto à concentração de ferro (0,08mmol L<sup>-1</sup>) e sem fósforo. Essa solução foi comum a todos os tratamentos, visando um suprimento adequado de água e dos demais nutrientes às plantas.

Para os experimentos, quantidades suficientes dos dois solos foram peneiradas em malha de 4 mm, receberam uma correção com CaCO<sub>3</sub> + MgCO<sub>3</sub> p.a. na relação equivalente Ca : Mg de 4 : 1, cujas doses foram estabelecidas por curvas de incubação visando elevar o pH a 6,0. Após a incubação por 30 dias em umidade aproximada à capacidade de campo, os solos foram secos ao ar, peneirados em 4 mm e avaliados os teores de umidade para o cálculo dos pesos necessários para ocupar os 2,4 dm<sup>3</sup> nos vasos e atender as densidades estabelecidas nos tratamentos.

Para o LE, utilizaram-se os níveis de densidade de 0,90 (densidade natural da amostra peneirada em malha de 4mm) e 1,20 g cm<sup>-3</sup> e no LV os níveis de densidade foram de 1,30 (densidade natural da amostra peneirada em malha de 4mm) e 1,70 g cm<sup>-3</sup>. Os quatro níveis de umidade dos solos, no momento da coleta de dados, foram caracterizados na época da colheita das plantas e serão descritos adiante. Em ambos os experimentos foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado, arranjado em esquema fatorial 2 x 2 x 4, sendo: dois solos, dois valores de densidade dos solos e quatro níveis de umidade dos solos no momento da coleta de dados, com quatro repetições.

Foram realizadas as adubações com fósforo, utilizando-se o superfosfato triplo comercial (P = 19,74% e Ca = 13,75%). No LE, cada vaso recebeu 4,86 g de superfosfato triplo ( $400 \text{ mg dm}^{-3}$  de P) e no LV, 3,65 g de superfosfato triplo ( $300 \text{ mg dm}^{-3}$  de P). Visando a manutenção da relação de Ca : Mg em 4 : 1, foi aplicada uma solução de  $\text{Mg Cl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ( $42,68 \text{ g L}^{-3}$ ), 20 mL por vaso para o LE e 15 mL por vaso para o LV. Após homogeneização, as amostras foram incubadas por 20 dias em sacos plásticos, com umidade aproximada à capacidade de campo.

Depois de secas ao ar e peneiradas em malha de 4 mm, foram estabelecidos, para cada solo, em um dos vasos geminados, os tratamentos de densidade, através do mesmo método descrito no Capítulo 2.

O experimento com soja antecedeu o experimento com eucalipto em função dos diferentes hábitos de crescimento/desenvolvimento dessas duas espécies. Para os dois experimentos, uma quantidade suficiente de sementes das duas espécies foi colocada para germinar em caixas com areia lavada e irrigadas diariamente. Oito dias após a semeadura para a soja e trinta e cinco dias para o eucalipto, as plântulas de ambas as espécies foram selecionadas pela uniformidade e tiveram sua raiz principal cortada a 2 cm abaixo do coleto, visando favorecer o crescimento das raízes secundárias. Após este procedimento, foram transferidas para bandejas com solução arejada de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( $15 \text{ mg L}^{-1}$  de Ca) fixadas em uma placa de isopor (Machado et al., 1983).

Quatro dias após para a soja, e quinze dias para o eucalipto, foi realizado o transplantio para os vasos geminados, dividindo-se o sistema radicular das plantas aproximadamente em duas partes iguais, colocando-se uma parte no solo e a outra parte na solução nutritiva, constantemente aerada, usando-se duas plantas por unidade experimental. Diariamente, o volume da solução nutritiva era completado com água desmineralizada, como também feita a correção do pH

para 5,5 utilizando-se um pHmetro portátil e soluções de NaOH ou HCl. Ambos os vasos de cada unidade experimental foram cobertos com uma tampa de isopor revestida com folha de alumínio para evitar a entrada de luz e a evaporação de água. Semanalmente, trocava-se a solução nutritiva e simultaneamente fazia-se a irrigação com água desmineralizada na superfície do vaso com solo, mantendo-se a umidade a 80% do volume total de poros ocupados com água (Freire et al., 1980) por meio de pesagens.

Decorridos trinta dias após o transplântio para a soja e cinquenta dias para o eucalipto, às 20 horas, foi trocada a solução nutritiva e simultaneamente foi realizada uma irrigação nos vasos com solo, suficiente para ocupar 80% do volume total de poros. Admitiu-se que o tempo decorrido das 20 horas até às 7 horas da manhã seguinte foi suficiente para uma homogeneização da umidade nos vasos com solo.

A partir das 7:00 horas da manhã do dia seguinte à irrigação, foram estabelecidos os quatro tratamentos do fator umidade do solo. Para tal, realizaram-se quatro colheitas sucessivas das espécies, espaçadas de 24 horas, todas realizadas às 7:00 horas da manhã (tempos 0, 24, 48 e 72 horas), coletando-se quatro repetições de cada solo em cada nível de densidade. Nesse período, os vasos com solo não receberam nenhuma irrigação e aqueles com solução nutritiva tiveram seus volumes completados diariamente com água deionizada e os valores de pH ajustados a 5,5.

Objetivou-se, nesses tempos de coleta das plantas, pelo efeito da transpiração, o estabelecimento de diferentes níveis de umidade nos solos dos vasos e avaliar seus efeitos sobre algumas variáveis analisadas, tais como: volume de exsudato xilemático, teor de fósforo no exsudato xilemático e conteúdo de fósforo no exsudato xilemático.

Em cada colheita, a parte aérea (PA) das plantas foi cortada a 1 cm acima do coleto e durante uma hora coletou-se o exsudato xilemático, no local

do corte, utilizando-se um tubo capilar colocado em contato direto na região do corte. Colocou-se o exsudato em um frasco de vidro previamente tarado à quarta casa decimal, estimando-se o volume por diferença de peso, assumindo-se sua densidade sendo igual a  $1 \text{ g cm}^{-3}$ . A concentração de fósforo no exsudato foi determinada de acordo com Braga e Defelipo (1974).

No final de cada tempo de coleta do exsudato, foi coletada uma amostra de todo o perfil do solo de cada vaso, com um amostrador cilíndrico, para determinação da umidade dos solos, em cada tempo de coleta dos dados.

Logo após a coleta do exsudato, as raízes crescidas na solução nutritiva (RN) e 36 horas mais tarde, as raízes crescidas no solo (RS), lavadas em água corrente e deionizada, juntamente com a parte aérea das plantas, foram colocadas para secar em estufa com circulação de ar a  $65 - 70^{\circ}\text{C}$  até peso constante, determinando-se a massa seca de cada parte. Após a moagem das diferentes partes em moinho tipo Willey, 200mg de cada material foram submetidos à digestão nítrico-perclórica, determinando-se o teor de fósforo total conforme Braga e Defelipo (1974). O fósforo acumulado em cada parte das plantas foi determinado relacionando-se seu teor com a matéria seca produzida.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios do peso da matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca de raízes crescidas nos solos (MSRS), matéria seca de raízes crescidas na solução nutritiva (MSRN) e do fósforo acumulado em cada parte vegetal foram influenciados ( $P < 0,01$ ) pelos solos e níveis de densidade utilizados (Tabelas 1 e 2). Essas variáveis não foram influenciadas pela umidade dos solos (tempos de amostragem ou de colheita) devido ao período muito curto entre as amostragens, de no máximo 72 horas. O objetivo de se estudar o fator umidade do solo, aplicada apenas no final dos experimentos, foi de através do

volume, concentração e conteúdo de fósforo no exsudato xilemático, obterem-se informações sobre o efeito do nível de água em solos de texturas e densidades diferentes, sobre o fluxo difusivo e absorção de fósforo pelas plantas.

Os resultados observados nesse trabalho (Tabelas 1 e 2) confirmam aqueles do Capítulo 2, em que o aumento da densidade dos solos diminuiu a produção de matéria seca da parte aérea e de raízes e o acúmulo de fósforo pelas plantas. Independente da densidade, o LV apresentou, em relação ao LE, maior crescimento e maior acúmulo de fósforo em ambas as espécies, à exceção do acúmulo de fósforo na MSPA e MSRS pela soja. Os fatores ligados à densidade e às características do solo, que isoladamente ou em conjunto concorrem para a redução do crescimento e absorção de fósforo pelas plantas, já foram discutidos no Capítulo 2.

TABELA 1. Produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) e de raízes crescidas no solo (MSRS) e na solução nutritiva (MSRN) pela soja e eucalipto cultivados no LE e LV em função dos níveis de densidade.

Solo	Densidade (g cm <sup>-3</sup> )	Soja			Eucalipto		
		MSPA	MSRS	MSRN	MSPA	MSRS	MSRN
		.....g vaso <sup>-1</sup> .....					
LE	0,90	8,33	1,14	1,25	12,34	2,45	1,13
	1,20	6,70(80) <sup>1</sup>	0,63(55)	1,04(83)	8,84(72)	1,46(60)	0,63(56)
	Média	7,52	0,88	1,14	10,59	1,95	0,88
LV	1,30	9,53	1,33	2,35	24,71	2,97	5,06
	1,70	6,05(63) <sup>1</sup>	0,59(44)	1,41(60)	14,65(59)	2,16(73)	2,42(48)
	Média	7,79(104) <sup>2</sup>	0,96(109)	1,88(165)	19,68(186)	2,56(131)	3,74(425)

<sup>1</sup> Os números entre parênteses representam, para cada variável, dentro de cada solo, a produção relativa do maior nível de densidade em relação ao nível menor, que recebeu o valor 100; <sup>2</sup> Os números entre parênteses representam para cada variável, a produção média do LV em relação ao LE, que recebeu o valor 100.

TABELA 2. Fósforo acumulado na matéria seca da parte aérea (MSPA) e de raízes crescidas no solo (MSRS) e na solução nutritiva (MSRN) pela soja e eucalipto cultivados no LE e LV em função dos níveis de densidade.

Solo	Densidade (g cm <sup>-3</sup> )	Soja			Eucalipto		
		MSPA	MSRS	MSRN	MSPA	MSRS	MSRN
		.....mg vaso <sup>-1</sup> .....					
LE	0,90	23,33	2,71	2,60	24,06	3,62	2,08
	1,20	18,94(81) <sup>1</sup>	1,21(45)	1,84(71)	16,49(68)	1,60(44)	1,16(56)
	Média	21,14	1,96	2,22	20,27	2,61	1,62
LV	1,30	15,63	1,90	2,90	41,75	3,66	5,84
	1,70	12,76(82) <sup>1</sup>	1,15(60)	1,95(67)	26,19(63)	2,26(62)	3,02(52)
	Média	14,20(67) <sup>2</sup>	1,52(77)	2,42(109)	33,97(167)	2,96(113)	4,43(273)

<sup>1</sup> Os números entre parênteses representam, para cada variável, dentro de cada solo, o acúmulo relativo de fósforo no maior nível de densidade em relação ao menor, que recebeu o valor 100; <sup>2</sup> Os números entre parênteses representam para cada variável, o acúmulo médio relativo do LV em relação ao LE, que recebeu o valor 100.

Tanto a produção de matéria seca quanto o acúmulo de fósforo, independente dos níveis de densidade dos solos, foram maiores nas raízes crescidas em solução nutritiva (MSRN) do que no solo (MSRS), exceto para o eucalipto no LE. Esses resultados concordam com Machado et al. (1983) e Ruiz et al. (1988a e b), que observaram, para a soja cultivada no sistema de vasos geminados com raízes subdivididas, que o crescimento de raízes não foi influenciado pela ausência de fósforo na solução nutritiva e nem pelo potencial hídrico a que estavam sujeitas as raízes desenvolvidas no solo. Os últimos autores relataram que esse fato é atribuído à organização vascular das raízes e da parte aérea, que não constituiria obstáculo ao transporte e redistribuição do fósforo no vegetal pelo fato de que a redistribuição desse elemento é facilitada por ser um nutriente móvel na planta (Marschner, 1995).

A metodologia, usada nesse trabalho, de se suspender a irrigação dos vasos com solo e fazer a coleta de exsudato em intervalos subseqüentes de 24 horas, no período de 0 a 72 horas, atingiu o objetivo básico de se reduzir a

umidade dos solos com o tempo de amostragem, em ambas as espécies (Tabelas 3 e 4). Observa-se que em termos relativos, a umidade dos solos decresceu mais no nível de densidade menor, à exceção do LV para o eucalipto, em que ocorreu o contrário.

A redução da umidade dos solos não apresentou um efeito definido e consistente sobre o volume de exsudato coletado (Tabelas 3 e 4), resultados que não concordam com os observados por Ruiz et al. (1988a) usando, também, a metodologia de raízes subdivididas em vasos geminados com soja. Esses autores observaram que o aumento da umidade na unidade do vaso com solo era acompanhado pelo incremento no volume de exsudato. Em tese, a porção radicular desenvolvida na unidade com solução nutritiva deveria contribuir decisivamente para o volume de exsudato xilemático, em resposta à condição de estresse hídrico submetido na porção radicular crescida no solo, devido a uma possível translocação inter-radicular, como relatado por Kirkham (1983), fato não confirmado por Ruiz et al. (1988a). No presente trabalho, embora a umidade do solo tenha diminuído com o tempo de amostragem, em boa parte dos casos o volume de exsudato aumentou, obtendo-se coeficientes de correlação baixos e, na grande maioria dos casos, não significativos entre as variáveis (Tabela 5), não se encontrando uma explicação plausível para esses resultados.

Pelos dados médios dos tempos de amostragens, observa-se que o aumento da densidade dos solos promoveu uma redução no volume de exsudato xilemático para ambas as espécies (Tabelas 3 e 4). Este fato pode ser explicado pelo menor crescimento das raízes das espécies em ambas as unidades do vaso, quando parte do sistema radicular foi desenvolvido no solo com maior densidade (Tabelas 1 e 2).

TABELA 3. Umidade do solo, volume de exsudato xilemático, concentração e conteúdo de fósforo no exsudato de plantas de soja cultivadas no LE e LV, em função dos níveis de densidade e tempo de amostragem.

Densidade (g cm <sup>-3</sup> )	Tempo de Amostragem (h)	Umidade do solo (%)	Exsudato xilemático		
			Volume μL h <sup>-1</sup>	Conc. P μg mL <sup>-1</sup>	Cont. P μg/2plantas
<b>Latossolo Vermelho-Escuro (LE)</b>					
0,90	0	56,6	854	37,4	32,0
	24	46,6 (82) <sup>1</sup>	1.491 (175)	31,4 (84)	46,9 (147)
	48	34,6 (61)	1.230 (144)	18,0 (48)	22,1 (69)
	72	29,5 (52)	1.521 (178)	8,8 (24)	13,3 (42)
	Média		1.274	23,9	28,6
1,20	0	40,1	772	34,1	26,3
	24	36,7 (92) <sup>1</sup>	936 (121)	29,6 (87)	27,7 (95)
	48	32,3 (81)	1.061 (137)	21,6 (63)	22,9 (87)
	72	30,9 (77)	648 (84)	17,9 (52)	11,6 (44)
	Média		854 (67) <sup>2</sup>	25,8 (108)	22,1 (77)
<b>Latossolo Vermelho-Amarelo (LV)</b>					
1,30	0	10,9	728	8,9	6,5
	24	9,9 (91) <sup>1</sup>	617 (85)	6,8 (76)	4,2 (65)
	48	7,5 (69)	688 (95)	5,6 (63)	3,9 (60)
	72	7,2 (66)	659 (91)	5,5 (62)	3,7 (57)
	Média		673	6,7	4,6
1,70	0	12,4	567	16,7	9,5
	24	10,1 (81) <sup>1</sup>	808 (143)	8,1 (49)	6,5 (68)
	48	8,4 (68)	550 (97)	7,3 (44)	4,0 (42)
	72	9,7 (78)	570 (101)	6,7 (40)	3,8 (40)
	Média		624 (93) <sup>2</sup>	9,7 (144)	5,9 (128)

<sup>1</sup> Os números entre parênteses representam, para cada variável, dentro de cada nível de densidade dos solos, o valor relativo dos tempos de amostragem em relação ao zero, que recebeu o valor 100; <sup>2</sup> Da mesma maneira, dentro de cada solo, os números entre parênteses representam o valor relativo do nível de densidade maior em relação ao menor, que recebeu o valor 100.

TABELA 4. Umidade do solo, volume de exsudato xilemático, concentração e conteúdo de fósforo no exsudato de plantas de eucalipto cultivadas no LE e LV, em função dos níveis de densidade e tempo de amostragem.

Densidade (g cm <sup>-3</sup> )	Tempo de Amostragem (h)	Umidade do solo (%)	Exsudato xilemático		
			Volume μL h <sup>-1</sup>	Conc. P μg mL <sup>-1</sup>	Cont. P μg/2plantas
<b>Latossolo Vermelho-Escuro (LE)</b>					
0,90	0	63,6	1.634	14,4	23,4
	24	54,1 (85) <sup>1</sup>	1.649 (101)	10,5 (73)	16,7 (71)
	48	49,0 (77)	115 (68)	8,9 (62)	9,9 (42)
	72	28,5 (45)	0	0	0
	Média		849	8,4 <sup>i</sup>	12,5
1,20	0	59,1	834	6,3	5,2
	24	48,8 (83) <sup>1</sup>	1.059 (127)	11,5 (182)	12,1 (233)
	48	46,9 (79)	1.463 (175)	11,7 (186)	17,2 (331)
	72	39,9 (68)	981 (118)	11,3 (179)	11,1 (213)
	Média		1.084 (98) <sup>2</sup>	10,2 (121)	11,4 (91)
<b>Latossolo Vermelho-Amarelo (LV)</b>					
1,30	0	14,7	2.303	10,3	23,9
	24	13,0 (88) <sup>1</sup>	1.763 (77)	6,5 (63)	11,6 (49)
	48	7,9 (54)	1.270 (55)	3,9 (38)	4,1 (17)
	72	7,4 (50)	1.837 (80)	1,6 (16)	2,8 (12)
	Média		1.793	5,6 <sup>i</sup>	10,6
1,70	0	21,3	1.443	10,2	15,7
	24	14,1 (66) <sup>1</sup>	1.618 (112)	8,3 (81)	12,6 (80)
	48	8,8 (41)	1.068 (74)	3,5 (34)	3,6 (23)
	72	7,6 (36)	751 (52)	2,8 (27)	1,9 (12)
	Média		1.220 (68) <sup>2</sup>	6,2 (111)	8,4 (79)

<sup>1</sup> Os números entre parênteses representam, para cada variável, dentro de cada nível de densidade dos solos, o valor relativo dos tempos de amostragem em relação ao zero, que recebeu o valor 100; <sup>2</sup> Da mesma maneira, dentro de cada solo, os números entre parênteses representam o valor relativo do nível de densidade maior em relação ao menor, que recebeu o valor 100.

Diferentemente do volume, a concentração e o conteúdo de fósforo no exsudato xilemático das espécies diminuíram com a redução do nível de umidade dos solos (tempos de amostragem), à exceção para o eucalipto no LE submetido à maior densidade (Tabelas 3 e 4), apresentando, na grande maioria dos casos, correlação positiva e significativa (Tabela 5). Interessante observar, considerando a média dos tempos de amostragens, ou seja, independente do nível de umidade, que a concentração de fósforo no exsudato xilemático foi maior no nível superior de densidade em relação ao nível inferior, e também maior no LE do que no LV. Para o conteúdo de fósforo no exsudato, o mesmo comportamento é observado quando se comparam os solos e, para os níveis de densidade, apenas para o LV com soja. O fósforo é transportado na solução do solo, fundamentalmente por difusão (Olsen e Kemper, 1968; Barber, 1974 e Nye e Tinker, 1977), cujo processo, de acordo com a equação de Nye e Tinker (1977) e Nye (1979), é regulado por diversos fatores, com destaque para o teor de umidade do solo, a interação do fosfato com os colóides do solo, gradiente de concentração e a distância a percorrer até as raízes. Ruiz et al. (1988a), trabalhando com dois Latossolos Vermelho-Amarelos, um de textura muito argilosa ( $630 \text{ g kg}^{-1}$  de argila) e outro de textura média ( $300 \text{ g kg}^{-1}$  de argila), submetidos a três níveis de umidade (-0,01, -0,04 e -0,30 MPa), cultivados com soja com raízes subdivididas em vasos geminados solo-solução nutritiva, baseado no conteúdo de fósforo no exsudato, evidenciaram a importância fundamental da água como veículo de difusão do fósforo, independente do nível do nutriente no solo. Os autores discutem, também, que o efeito da umidade sobre a difusão de fósforo será mais crítico quanto maior for a participação da areia na composição granulométrica do solo, devido à baixa retenção de água, necessária ao transporte do nutriente até a superfície radicular. Comentaram, ainda, que embora o fator impedância (tortuosidade) seja de difícil avaliação, considerando a condutividade hidráulica como um indicativo da tortuosidade,

**TABELA 5.** Coeficientes de correlação linear simples entre a umidade dos solos (% em peso) e o volume, concentração e conteúdo de fósforo no exsudato xilemático da soja e do eucalipto cultivados no LE e LV.

Densidade (g cm <sup>-3</sup> )	Soja			Eucalipto		
	Volume	Conc. P	Cont. P	Volume	Conc. P	Cont. P
<b>Latossolo Vermelho-Escuro (LE)</b>						
0,90	-0,70ns	0,98**	0,71ns	0,96*	0,99**	0,98**
1,20	0,03ns	0,99**	0,78*	-0,37ns	-0,85*	-0,62ns
<b>Latossolo Vermelho-Amarelo (LV)</b>						
1,30	0,22ns	0,94**	0,83*	0,71ns	0,95**	0,94**
1,70	0,02ns	0,91**	0,93**	0,75ns	0,96*	0,95**

\*\* , \* e ns – significativo a 1 e 5% e não significativo pelo teste de t.

sabe-se que na saturação, a condutividade hidráulica é tipicamente maior para um solo arenoso do que para um argiloso. Entretanto, em condições não saturadas, a condutividade hidráulica diminui mais marcadamente no solo arenoso do que no argiloso (Hillel, 1971). Assim, o fator impedância do solo mais arenoso poderia ser maior que do argiloso para os maiores potenciais (menor umidade) e menor para os menores potenciais (maior umidade), observando-se, assim, uma oscilação tanto mais pronunciada desse fator quanto maior o teor de areia no solo. Esses fatos, pelo menos em parte, justificam os resultados observados no presente trabalho, em que se observou maior concentração e maior conteúdo de fósforo no exsudato xilemático no LE em relação ao LV e na densidade maior em relação à densidade menor.

#### 4 CONCLUSÕES

O aumento da densidade dos solos foi mais prejudicial ao crescimento das plantas no Latossolo Vermelho-Escuro do que no Latossolo Vermelho-

Amarelo, como também promoveu uma redução no volume de exsudato xilemático para ambas as espécies.

O fornecimento de fósforo somente ao solo, não prejudicou o crescimento das raízes das plantas na solução nutritiva, sem a presença desse nutriente.

A concentração de fósforo no exsudato xilemático diminuiu com a redução da umidade dos solos, tanto na soja quanto no eucalipto.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBER, S.A. Influence of the plant root on ion movement in soil. In: CARSON, E.W. The plant root and its environment. Charlottesville: University of Virginia, 1974. p.525-564.
- BRAGA, J.M.; DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extrato de solos e plantas. *Revista Ceres*, Viçosa, v.21, p.73-85, 1974.
- CAMARGO, O.A; ALLEONI, L.R.F. Compactação do solo e desenvolvimento das plantas. Piracicaba: ESALQ/USP, 1997. 132p.
- CLARK, R.B. Characterization of phosphates of intact maize roots. *Journal Agricultural Food Chemistry*, Columbus, v.23, p.458-460, 1975.
- FREIRE, J.C.; RIBEIRO, M.A.V.; BAHIA, V.G.; LOPES, A.S.; AQUINO, L.H. de. Resposta do milho cultivado em casa de vegetação a níveis de água em solos da região de Lavras (MG). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.4, n.1, p.4-8, jan./abr. 1980.
- HILLEL, D. Soil and water: physical principles and processes. New York: Academic, 1971. 288p.
- KIRKHAN, M.B. Physical model of water in a split-roots system. *Plant and Soil*, Hague, v.75, p.153-168, 1983.
- MACHADO, R.P.; NOVAIS, R.F.; SEDIYANA, C.S.; BORGES, A.C. Efeito da localização de doses de fósforo em relação ao sistema radicular sobre o

comportamento da soja, com a utilização da técnica de raízes subdivididas. *Revista Ceres, Viçosa*, v.30, p.295-307, 1983.

MARSCHNER, H. *Mineral nutrition of higher plants*. London: Academic, 1995. 889p.

NYE, P.H. Diffusion of ions and uncharged solutes in soils and soil clays. *Advance Agronomy*, v.31, p.225-272, 1979.

NYE, P.H.; TINKER, P.B. *Solute movement in the soil-root system*. Berkeley: University of California, 1977. 342p.

OLSEN, S.R.; KEMPER, W.D. Movement of nutrients to plant roots. *Advance Agronomy*, New York, v.20, p.91-151, 1968.

RUIZ, H.A.; FERNANDES, B.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. Efeito da umidade do solo sobre o volume e o conteúdo de fósforo no exsudato xilemático de soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas*, v.12, n.1, p.39-42, jan./abr. 1988a.

RUIZ, H.A.; FERNANDES, B.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; FERREIRA, P.A. Efeito do conteúdo de água sobre os níveis críticos de fósforo em dois latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas*, v.12, n.1, p.43-48, jan./abr. 1988b.