

**SÉRGIO RICARDO SILVA**

**CRESCIMENTO DE EUCALIPTO INFLUENCIADO PELA COMPACTAÇÃO  
DE SOLOS E DOSES DE FÓSFORO E DE POTÁSSIO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2000

A todos aqueles que acreditam na verdade, na justiça e na igualdade,  
que não perdem a esperança mesmo frente às maiores adversidades,  
que confiam em Deus e lutam para fazer aquilo que deve ser feito, sem para  
isso perder o humor e a felicidade de viver cada dia

A Deus

Aos meus pais Pedro e Marli

A meus irmãos Marcélio e Liliane

A meus amigos e familiares

Dedico.

## **AGRADECIMENTO**

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realização dos cursos de graduação e de pós-graduação.

Ao professor Nairam Félix de Barros, pela confiança e paciência, pelo otimismo e motivação, pelo exemplo e ensinamentos de tantos anos.

Aos amigos Mário e Luciano, pela amizade e inestimável colaboração na execução do experimento.

Aos funcionários dos Departamentos de Solos e Fitotecnia, por toda ajuda, colaboração e convívio: Cardoso, Beto, Geraldo, Carlos, Lula, Pedro Lélis, Domingos Sávio, Itamar e Mara.

A José Luís Teixeira pelo auxílio nas análises estatísticas e na confecção gráfica da tese.

Aos professores Júlio César Lima Neves, Paulo Roberto Gomes Pereira, Roberto Ferreira de Novais e Victor Hugo Alvarez Venegas, pelas sugestões, pelos ensinamentos e pelo exemplo de profissionalismo.

Aos professores João Carlos Ker e Hermínia E. P. Martinez pela participação na defesa de tese e pela contribuição com as correções sugeridas.

Aos amigos e colegas da graduação e da pós-graduação, em especial Marcelo, Carlos, Luis Antônio, Roberto, Gilvan, Adão e a tantos outros, pela convivência, pelo auxílio e pela amizade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível

Superior (CAPES), pelas bolsas concedidas durante a iniciação científica e pós-graduação.

A meus pais Pedro e Marli, pela vida, pelo amor, pelo carinho, pela educação e formação moral, pelo apoio, incentivo e dedicação em todos os momentos da minha vida.

A meus irmãos Marcélio e Liliane, pelo convívio, pela força nos momentos difíceis, pela demonstração de carinho e presença sempre constante e oportuna.

À RCC/Viçosa, ao Grupo Semente e ao Grupo de Oração Cenáculo do Senhor, pela formação cristã e fortalecimento de minha fé, o que foi decisivo para o desempenho das atividades acadêmicas e para o relacionamento humano dentro e fora da UFV.

A Deus, por tudo.

## **BIOGRAFIA**

**Sérgio Ricardo Silva**, filho de Pedro de Alcântara da Silva e Marli das Graças Silva, nasceu em 11 de junho de 1974, em Caratinga, Estado de Minas Gerais.

Realizou em Caratinga o primeiro grau na Escola Estadual Princesa Isabel e na Escola da Comunidade João Caetano do Nascimento, onde concluiu o segundo grau em 1992.

Em 1993, ingressou no curso de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa. Foi bolsista de Iniciação Científica no Departamento de Solos, de março de 1996 a fevereiro de 1998, sob orientação do professor Nairam Félix de Barros. Foi monitor da disciplina SOL 375, Fertilidade do Solo, no período de julho a outubro de 1998. Colou grau em outubro deste ano.

Em outubro de 1998, iniciou o curso de Pós-Graduação em Fitotecnia, em nível de Mestrado, com área de concentração em Nutrição Mineral e Adubação de Plantas, submetendo-se à defesa de tese em agosto de 2000.

Iniciou o Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, em nível de Doutorado, em agosto de 2000, na UFV.

## CONTEÚDO

RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Aspectos conceituais e causas da compactação.....	3
2.2. Compactação de solos em áreas florestais.....	6
2.3. Efeitos da compactação.....	8
2.3.1. Propriedades físicas do solo.....	8
2.3.2. Crescimento e desenvolvimento de plantas.....	9
2.3.3. Nutrição fosfatada e potássica.....	12
2.4. Práticas de controle da compactação do solo.....	15
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
3.1. Solos.....	17
3.2. Ensaio.....	18
3.3. Colheita e características avaliadas.....	20
3.4. Índices de eficiência.....	21
3.5. Análise estatística.....	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
4.1. Ensaio 1: Compactação <i>versus</i> doses de fósforo.....	24
4.1.1. Produção de biomassa.....	24
4.1.2. Concentração de fósforo na planta.....	29

4.1.3. Conteúdo de fósforo na planta.....	32
4.1.4. Índices de eficiência.....	35
4.1.5. Crescimento e características radiculares.....	40
4.2. Ensaio 2: Compactação <i>versus</i> doses de potássio.....	47
4.2.1. Produção de biomassa.....	47
4.2.2. Concentração de potássio na planta.....	52
4.2.3. Conteúdo de potássio na planta.....	53
4.2.4. Índices de eficiência.....	58
4.2.5. Crescimento e características radiculares.....	61
5. RESUMO E CONCLUSÕES.....	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
APÊNDICE A.....	80
APÊNDICE B.....	88
APÊNDICE C.....	94

## RESUMO

SILVA, Sérgio Ricardo, M.S., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2000.  
**Crescimento de eucalipto influenciado pela compactação de solos e doses de fósforo e de potássio.** Orientador: Nairam Félix de Barros.  
Conselheiros: Roberto Ferreira de Novais e Paulo Roberto Gomes Pereira.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o crescimento e a nutrição de eucalipto influenciado pela compactação de solos e doses de fósforo e de potássio. Utilizaram-se amostras de dois solos com texturas diferentes, em casa de vegetação, sendo os tratamentos dispostos num fatorial 4X3 (níveis de adubação X densidades do solo), em delineamento inteiramente casualizado. Quatro repetições foram utilizadas no ensaio de P e três repetições para o ensaio de K. Os solos foram acondicionados em vasos de PVC com 2 dm<sup>3</sup> de solo e compactados com o auxílio de uma prensa hidráulica. Para o solo argiloso foram testadas as densidades de 0,91; 1,10 e 1,30 g cm<sup>-3</sup> e para o solo franco-arenoso 1,35; 1,55 e 1,75 g cm<sup>-3</sup>. As doses de fósforo foram 0, 150, 300 e 600 mg kg<sup>-1</sup>, para o solo argiloso (LV), e 0, 100, 200 e 400 mg kg<sup>-1</sup>, para o solo franco-arenoso (LVA). As doses de potássio foram 0, 50, 100 e 150 mg kg<sup>-1</sup> para os dois solos. A espécie testada foi o *Eucalyptus camaldulensis*. O experimento foi colhido 100 dias após a emergência, sendo realizada a quantificação da matéria seca, mensuração de raízes (comprimento, diâmetro médio e superfície radicular) e análises químicas para determinar os teores de



fósforo e potássio no tecido vegetal e no solo. Constatou-se que a compactação do solo, de modo geral, reduziu o crescimento das raízes e a eficiência de utilização de P e K, e aumentou o diâmetro médio radicular. Houve, em resposta às doses de fósforo, aumento do comprimento e superfície radiculares, da matéria seca, do conteúdo de P no tecido vegetal e da razão de eficiência radicular; as doses de potássio elevaram o conteúdo de K no tecido vegetal e a razão de eficiência radicular, e proporcionaram aumento da matéria seca apenas nos tratamentos com maiores níveis de compactação. Conclui-se que a aplicação de fósforo em solos compactados e de potássio naqueles exageradamente compactados é fundamental para o crescimento de plantas de eucalipto; e que a compactação reduz o crescimento radicular e a eficiência da adubação fosfatada e potássica.

## ABSTRACT

SILVA, Sérgio Ricardo, M.S., Universidade Federal de Viçosa, August 2000.  
**Growth of eucalypt influenced by soil compaction and doses of phosphorus and potassium.** Adviser: Nairam Félix de Barros. Committee members: Roberto Ferreira de Novais and Paulo Roberto Gomes Pereira.

The objective of this study was to evaluate the influence of soil compaction and doses of phosphorus and potassium on growth of eucalypts. Samples of two soils with different texture were used in a greenhouse study. Two experiments were conducted, using a completely randomized design with treatments arranged in a 4 x 3 factorial, corresponding to the application of four levels of P or K and three compaction levels. Four replications were used in the experiment involving P and three in that involving K. The soils, a clayey Red-Latosol (LV) and a sandy Red Yellow-Latosol (LVA), were placed in pots made of PVC pipe, 2.0 dm<sup>3</sup> capacity, and compacted using a hydraulic press in order to reach the densities of 0.91, 1.10 and 1.30 g cm<sup>-3</sup> for the LV, and 1.35, 1.55 and 1.75 g cm<sup>-3</sup> for the LVA. The rate of P were 0, 150, 300 and 600 mg kg<sup>-1</sup> for the LV, and 0, 100, 200 and 400 mg kg<sup>-1</sup> for the LVA. The rates of K were 0, 50, 100 and 150 mg kg<sup>-1</sup>, for both soils. Two eucalypt plants (*E. camaldulensis*) were cultivated in each pot. One hundred days after seedling emergence, the shoot of the plants was harvested and assessed the dry weight, P and K concentrations, root density, root surface area and root mean diameter.

Increasing soil compaction reduced root growth, shoot growth, and utilization efficiency of P and K, but increase the root mean diameter. Increasing soil P increased root and shoot growth, plant nutrient content and root efficiency rate. Increasing soil K increased plant nutrient content and root efficiency rate, but had no effect on shoot growth in low levels of compaction. This study indicated that the addition of P to compacted soil and K, particularly, to very compacted soil is essential for plant growth because increasing soil compaction reduces root growth and the efficiency of P and K acquisition by roots.

## 1. INTRODUÇÃO

Em várias áreas de cultivo de eucalipto no Brasil, o uso de máquinas pesadas na fase de preparo do solo e da colheita da madeira pode levar à compactação do solo.

A compactação reduz o crescimento de plantas por seu efeito no crescimento de raízes e conseqüente redução na absorção de água e de nutrientes. Além disso, a compactação pode interferir na movimentação de água e de nutrientes no solo, reduzindo sua disponibilidade para as plantas. Assim, pode-se antecipar que nessas condições, a produtividade florestal pode ser comprometida temporariamente ou de maneira permanente.

A movimentação de nutrientes no solo se dá por difusão e, ou, por fluxo de massa, dependendo do nutriente e de sua concentração em solução. A compactação, ao interferir com a movimentação da água, pode reduzir a transpiração das plantas e, conseqüentemente, o fluxo de massa. Acima de certo nível, ela reduz também a difusão de nutrientes. A difusão de nutrientes é uma função inversa da densidade do solo, característica diretamente relacionada com a compactação. NOVAIS e SMITH (1999) levantam também a possibilidade de que em solos tropicais com elevada capacidade de sorção de ânions, elementos como o fósforo teriam sua difusão reduzida em razão de a compactação aproximar o íon da superfície de sorção.

Apesar de representar um problema potencial para a nutrição mineral de florestas manejadas, poucos estudos foram conduzidos para avaliar o efeito

da compactação sobre a nutrição de eucalipto. Apesar deste problema ser específico às condições de campo, estudos conduzidos em condições mais controladas podem servir para avaliar a magnitude relativa da compactação sobre o crescimento das raízes e da parte aérea de plantas e sobre sua nutrição. Nesse sentido, a compreensão dessas relações para fósforo e para potássio é de grande relevância prática por serem esses dois nutrientes, com frequência, os mais limitantes ao crescimento de florestas de eucalipto no país (BARROS et al., 1981a; BARROS e NOVAIS, 1996).

A falta de informações sobre a dinâmica de crescimento de raízes tem limitado o conhecimento da estrutura e do comportamento das florestas tropicais (VANCE e NADKARNI, 1992). Esta carência de conhecimento nas espécies arbóreas ainda mantém uma lacuna que, se conhecida, certamente auxiliaria no entendimento do crescimento diferencial das plantas em resposta à adubação e a condições adversas, como a compactação do solo. A razão para esta deficiência de informações pode ser explicada pela dificuldade encontrada em estabelecer um método adequado que permita avaliar, com eficácia, o sistema radicular das plantas, pela dificuldade operacional e pelo alto custo de amostragem (BOHM, 1979; JORDAN e ESCALANTE, 1980; KREJCI et al., 1986; AMATO e PARDO, 1994). Portanto, uma melhor compreensão da dinâmica de crescimento de raízes junto com a de crescimento da parte aérea pode melhorar o entendimento da nutrição do eucalipto e ajudar no desenvolvimento de técnicas para detecção e correção de deficiências nutricionais de sítios florestais (ADAMS et al., 1987).

Este trabalho teve como objetivo avaliar a nutrição e o crescimento de eucalipto influenciado pela compactação de solos e doses de fósforo e de potássio.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Aspectos conceituais e causas da compactação**

A estrutura de um solo é expressa pelo arranjo espacial das partículas sólidas e dos poros e é extremamente importante para o crescimento de raízes, em virtude de controlar, diretamente, o teor de água, a aeração e a resistência do solo à penetração de raízes (TAYLOR, 1971).

O termo compactação do solo refere-se à compressão do solo não saturado durante a qual existe um aumento de sua densidade em consequência da redução do seu volume, resultante da expulsão de ar dos poros, causando um rearranjo mais denso das partículas do solo e consequente redução da porosidade (GUPTA e ALLMARAS, 1987; CURTI et al., 1993; DIAS JÚNIOR e PIERCE, 1996).

Quando o fenômeno de redução de volume ocorre com a expulsão de água dos poros, este fenômeno passa a se chamar adensamento. Entretanto, quando a redução de volume decorre de processos pedogenéticos, este fenômeno denomina-se também adensamento. Como exemplo de camadas adensadas, têm-se: fragipans, duripans, plintitas, etc. (DIAS JÚNIOR, 2000).

O adensamento é a redução natural do espaço poroso e consequente aumento da densidade de camadas ou horizontes do solo por dessecação, ciclos de umedecimento e secagem, iluviação ou precipitação química (CURTI et al., 1993; COSTA e ABRAHÃO, 1996).

O preparo excessivo muitas vezes resulta na pulverização do solo, o que facilita o adensamento. Ao ocorrer pulverização, a acomodação das partículas é facilitada, visto que reduz o tamanho de espaços vazios entre elas. Chuvas sobre o solo desnudo e pulverizado facilitam esse ajuste de partículas. Contudo, cada solo com características físicas, químicas e mineralógicas distintas tem tendência diferente ao adensamento (JUCKSCH, 1987; COSTA, 1990; NOVAIS e SMYTH, 1999).

A facilidade com que o solo não saturado decresce de volume quando sujeito a pressões é chamada de compressibilidade, a qual depende de fatores externos e internos. Os fatores externos são caracterizados pelo tipo, intensidade e frequência da carga aplicada, enquanto os fatores internos são influenciados pela história de tensão, umidade, textura, estrutura, densidade inicial e teor de carbono do solo (DIAS JÚNIOR, 2000).

A densidade do solo, que é influenciada pela textura e densidade de partículas, é um referencial muito utilizado para caracterizar a compactação e, ou, o adensamento. Entretanto, segundo GOMES (1996), a densidade do solo não se mostra muito adequada nos estudos de adensamento e, ou, compactação em solos sujeitos a grandes variações texturais. Relato semelhante foi feito por FERNANDES (1996), que concluiu sobre a influência das características químicas, físicas e mineralógicas na compactação de três Latossolos, que a densidade do solo não refletiu a intensidade da condição de compactação observada no campo, embora tenha verificado seu aumento com o cultivo.

A desestruturação do solo é causada por modificações químicas, como a induzida pela calagem, e físicas, provocadas por ciclos de umedecimento e secagem (JUCKSCH, 1987; OLIVEIRA, 1992). As principais causas, que podem ser naturais ou antrópicas, são a chuva e os dispersantes químicos, que desagregam o solo, levando à dispersão das partículas, além da desagregação mecânica, com enxada rotativa e grades.

CARVALHO JÚNIOR et al. (1998), estudando modificações causadas pelo uso do solo e a formação de camadas compactadas e, ou, adensadas em um Latossolo Vermelho, verificaram que solos com maior teor de argila dispersa em água, quando cultivados, foram mais favoráveis à formação de camadas adensadas em subsuperfície. Esses autores observaram que o

aumento de cargas negativas nos solos cultivados, devido à calagem, pode provocar aumento da argila dispersa em água, levando à formação de camadas adensadas.

A elevada capacidade de retenção de fósforo em solos tropicais oxidados, torna necessário a utilização de grandes quantidades desse nutriente. Os benefícios dessa prática são inegáveis, porém tem sido verificado alteração no balanço de cargas e efeito dispersivo nos colóides do solo em virtude da adsorção de fosfato. Este efeito pode alterar as propriedades físicas e comprometer o estado de agregação do solo, tornando-o mais susceptível à compactação (SILVA et al., 1999).

Outra variável a ser considerada no processo de compactação e adensamento do solo é sua textura. Solos com partículas de mesmo tamanho são menos susceptíveis à compactação, comparados àqueles onde há mistura de argila, silte e areia. Isto se deve ao fato de as partículas de tamanhos diferentes se arranjam e preencherem os poros, quando submetidas a uma pressão (MANTOVANI, 1987).

A compactação dos solos agrícolas pode ocorrer pela pressão causada pelo tráfego de máquinas, que promovem a desagregação do solo (BORGES, 1986; SILVA et al., 1986; NOVAK et al., 1992; OLIVEIRA et al., 1998). Esse efeito é intensificado pelo uso contínuo do solo, como nas atividades agrícolas e florestais, bem como na pecuária por meio do pisoteio de animais em pastoreio (COSTA, 1990; SILVA et al., 1992; KONDO, 1998).

Muitas vezes, com o aumento da profundidade, ocorre uma tendência natural de elevação da densidade do solo, em consequência da menor quantidade de matéria orgânica, da menor agregação, e também da maior compactação provocada pelo peso das camadas subjacentes (FERNANDES e VITÓRIA, 1998).

Dentre outras origens, YOUNG (1998) observou mudanças na densidade do solo causadas pela elongação radicular. Segundo este autor, a expansão radial e axial das raízes provoca um aumento da densidade, além de gerar fraturas no solo. Isto concorda com resultados obtidos por WHITE (1975), que observou a ocorrência da compactação do solo no entorno das raízes, provocada pelo crescimento radial destas.



Para comprovar o efeito das raízes no seu entorno, DEXTER (1987) criou uma modelagem simplificada, baseada na teoria da expansão de corpos cilíndricos em meios friccionais plásticos, com o objetivo de medir a compressão do solo no entorno das raízes. Segundo este autor, a densidade do solo diminui exponencialmente com a distância da superfície das raízes, com um expoente que é um múltiplo constante do diâmetro radicular. A zona de compressão descrita aqui, pode resultar em mudanças em um número de importantes propriedades do solo, incluindo aeração e condutividade hidráulica, além de influenciar importantes processos da rizosfera.

Contraopondo aos sistemas de preparo com mobilização total da camada superficial do solo, o sistema de semeadura direta mobiliza o solo apenas na linha de semeadura, mantendo a superfície coberta pelos restos da cultura anterior. Entretanto, o não revolvimento do solo na semeadura direta provoca compactação da camada superficial (DE MARIA et al., 1999).

## **2.2. Compactação de solos em áreas florestais**

Após a derrubada, as árvores devem ser removidas da área até a estrada ou pátio de estocagem para posterior transporte. Para isto, são usados *skidders* ou tratores de esteira, sendo que, nessas operações, o solo e a vegetação também são afetados. O uso de maquinários pesados na extração de madeira induz à ocorrência de processos físicos e mecânicos no solo. Efeitos visíveis são os sulcos ou trilhas formados pelos pneus, tratores de esteira e transporte de carga. A magnitude do dano depende do equipamento utilizado, do conteúdo de água no solo, do próprio solo, do número de passadas com máquinas e das condições climáticas (MARTINS, 1995).

Degradação de solos pela compactação, em ecossistemas florestais, é sem dúvida um problema no manejo florestal, no qual têm-se utilizado máquinas de maior tamanho e capacidade de carga, em especial na exploração madeireira. Sob a influência do tráfego realizado repetidas vezes na mesma área, nas diversas operações de preparo do solo, colheita e transporte das toras de madeira, o solo é submetido a estresses severos devido às forças mecânicas exercidas pela tração e derrapagem dos pneus (HERBAUTS et al., 1996; WHITMAN et al., 1997).

MALTONI (1994), trabalhando em um Latossolo Vermelho, observou que a pressão aplicada pelo tráfego de máquinas compactou o solo. Os efeitos da compactação persistiram por longo tempo, isto é, mesmo após seis anos da implantação da cultura do eucalipto. Resultados semelhantes, em florestas plantadas, foram observados por MARTINS (1995), que verificou que o processo de regeneração é muito vagaroso em solos compactados por máquinas, cujos efeitos podem persistir por 40 anos ou mais.

Alguns estudos sobre a persistência da compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas mostraram que os efeitos da compactação do solo são apenas temporariamente prejudiciais; todavia, na maioria dos casos, pouca ou nenhuma modificação da compactação foi observada. Portanto, a compactação presente na camada arável tende a ser aliviada pelo preparo do solo nos cultivos sucessivos. No entanto, a compactação permanece, em forma de um aumento da densidade dos agregados, refletindo estes a densidade da camada compactada destruída pelo preparo (DIAS JÚNIOR e PIERCE, 1996).

A compactação e a remoção da camada superficial do solo durante a exploração florestal foram consideradas por WOODWARD (1996) como as responsáveis pela redução da porosidade total, do teor de matéria orgânica e da disponibilidade de fósforo e nitrogênio, bem como pelo aumento da densidade do solo, o que resultou na redução da altura das três espécies de árvores pesquisadas.

O uso de máquinas para abertura de floresta na Amazônia Central causou a compactação do solo, alterando sobremaneira o sistema poroso, como foi demonstrado por CHAUVEL et al. (1991). Nesse caso, a superfície dos solos foi bastante compactada, levando a uma modificação drástica de suas propriedades físicas e químicas.

GABRIEL FILHO (1993) relatou que o tráfego de máquinas provoca diminuição dos poros e aumento da densidade do solo, o que afeta a produção de madeira nas principais áreas de reflorestamento, em especial na cultura de eucalipto. O autor, avaliando o crescimento de plantas de eucalipto em vasos, confirmou tais observações.

O tipo de máquina utilizada na exploração florestal é de grande importância na intensidade de compactação ocasionada. Estudando o efeito da compactação do solo causada pelo tráfego de três tipos de máquinas em uma

área reflorestada com eucalipto, FERNANDES e VITÓRIA (1998) concluíram que o menor incremento da densidade do solo foi provocado pelo “Forwarder” seguido pelo “Harvester”, e o maior pelo guincho-arrastado .

### **2.3. Efeitos da compactação**

Os sintomas de compactação do solo podem ser observados tanto no solo quanto na planta. Entre os sintomas observados nos solos compactados, podem-se destacar: presença de crostas, aparecimento de trincas nos sulcos de rodagem do trator, zonas endurecidas, empoçamento de água, erosão hídrica excessiva, presença de resíduos vegetais parcialmente decompostos muitos meses após sua incorporação, necessidade de maior potência das máquinas de cultivo, etc. Já na planta, podem-se destacar os seguintes sintomas: baixa emergência e variação no tamanho das plantas, folhas amareladas, sistema radicular raso e horizontal, raízes mal formadas e, ou, tortas, etc. (DIAS JÚNIOR, 2000).

#### **2.3.1. Propriedades físicas do solo**

As mudanças que ocorrem nas propriedades físicas do solo incluem: aumento na densidade do solo; decréscimo no volume de macroporos; infiltração e movimento interno de água mais lentos; aeração mais pobre e maior resistência mecânica do solo ao crescimento de raízes, ocorrendo ainda alteração no fluxo de calor e de nutrientes na camada compactada (CAMARGO, 1983; PRIMAVESI, 1983; COSTA, 1990; RAB, 1996; OLIVEIRA et al., 1998).

NADIAN et al. (1996), observaram que o conteúdo de oxigênio na atmosfera do solo foi reduzido de  $0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  em solos levemente compactados para  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  em solos altamente compactados.

ALVARENGA et al. (1996), em experimento com leguminosas, verificaram que, com o aumento da compactação do solo, houve decréscimos na porosidade total e na macroporosidade das amostras, e acréscimos na microporosidade e na resistência do solo à penetração, sendo que nessas condições, as raízes têm grande dificuldade em penetrar o solo, como também

observado em outros trabalhos (SOUZA, 1988; SILVA et al., 1992).

Os solos, por apresentarem diferentes características e propriedades, mostram comportamentos distintos, quando submetidos à compactação. Assim, de acordo com SILVA et al. (1986), espera-se que a susceptibilidade do solo à compactação cresça à medida que o teor de areia dos solos aumente.

DIAZ ZAMBRANA (1994), utilizando amostras de Areia Quartzosa (AQ), Latossolo Vermelho (LV) e Latossolo Variação Una (LU), obteve como resultado da compactação redução mais acentuada da porosidade total, da macroporosidade, da condutividade hidráulica e do aprofundamento radicular de plantas de soja e caupi em amostras de AQ, em comparação aos Latossolos. Dos Latossolos, o LU sofreu efeito menos drástico que o LV.

A compactação diminui a infiltração de água no solo, ao provocar a alteração no tamanho e continuidade dos poros, causando drenagem interna deficiente; reduz também o movimento de água para as raízes, e ambos fatores retardam o crescimento das plantas. Dependendo do tipo de solo, um pequeno aumento de sua densidade, causado pela compactação, pode diminuir a taxa de infiltração em até 80% (OLIVEIRA et al., 1998).

O fato da compactação do solo diminuir a taxa de infiltração e também modificar sua estrutura, o torna mais susceptível à erosão. A diminuição da infiltração de água no solo aumenta o escoamento superficial (*run-off*) e, conseqüentemente, aumenta a erosividade por causa da maior quantidade de água que fica sobre o solo (GOSS et al., 1984).

Pouco aproveitamento das águas de chuvas, em razão do aumento do escoamento superficial; constante saturação do perfil, causando danos às raízes por condições de anaerobiose e redução química (toxidez de ferro e, ou, de manganês); e menor transporte de nutrientes em direção às raízes são algumas das conseqüências agrônômicas advindas da redução da infiltração de água em razão da compactação do solo (BORGES, 1986).

### **2.3.2. Crescimento e desenvolvimento de plantas**

Segundo MARSCHNER (1995), a menor extensão de raízes em solos compactados, particularmente em condições de campo, está relacionada a vários fatores. Em solos secos, o aumento da resistência mecânica e

decréscimo do potencial de água no solo podem ser mais importantes; em contrapartida, em solos úmidos a deficiência de oxigênio e a acumulação de etileno e fitotoxinas são os fatores principais.

A redução na expansão do sistema radicular, possivelmente, se dê em razão do acúmulo de CO<sub>2</sub> e da baixa difusão de oxigênio (SHIERLAW e ALSTON, 1984; NADIAN et al., 1996). Quando a concentração de O<sub>2</sub> é muito baixa, pode ocorrer redução na pressão de turgescência da célula ou, mesmo, maior resistência da parede celular ao alongamento (BORGES et al., 1997).

MAPFUMO et al. (1998), atribuíram a redução do crescimento das plantas à combinação do aumento da resistência à penetração de raízes, deficiência de oxigênio, e a alterações no ambiente da rizosfera que afetaram a disponibilidade de nutrientes para as plantas.

O tipo de raiz é importante no processo de exploração do solo compactado, sendo que as raízes pivotantes, de grande diâmetro, são menos eficientes na penetração em solos com alta densidade aparente, em relação a raízes secundárias de menor diâmetro (SILVA et al., 1992). Quando as raízes não podem explorar maior volume do solo, o acesso aos nutrientes pelas raízes torna-se difícil, pois, além de diminuir a massa radicular, a compactação age sobre propriedades físicas do solo de grande importância nos processos de transporte no solo, particularmente de água e de solutos (CINTRA e MIELNICZUKL, 1983; ROSOLEM et al. 1994; OLIVEIRA et al., 1998).

Trabalhando com soja, MORAES (1988) relatou que a penetração e o crescimento do sistema radicular das plantas ficaram impedidos quando a densidade do solo atingiu valores de 1,30 e 1,23 g cm<sup>-3</sup>, respectivamente, para a Terra Roxa Estruturada e o Latossolo Roxo.

Geralmente, as raízes em solos compactados apresentam-se deformadas, ramificam-se facilmente, são menos porosas e consomem maior quantidade de oxigênio por unidade de peso do tecido fresco. Conseqüentemente, tendem a alocar maior quantidade de carbono no sistema radicular (CINTRA, 1980).

Observa-se também que, além de se concentrarem acima da camada compactada, as raízes podem apresentar-se com alterações fisiológicas e morfológicas, ou seja, curtas, grossas, escamosas, com parede celular grossa e com elevada massa de matéria seca, sugerindo maior taxa de respiração e

maior resistência estrutural. Tais características são próprias de raízes que crescem em ambiente redutor, pois a compactação pode causar encharcamento do solo, por causa da drenagem deficiente (SHIERLAW e ALSTON, 1984; MATERECHERA et al., 1992; ALVARENGA et al., 1996; MISRA e GIBBONS, 1996).

A magnitude do espessamento das raízes é, entretanto, menor em estudos no campo do que em casa de vegetação (MATERECHERA et al., 1992). Esta diferença é atribuída à maior força de compactação usada em laboratório e à escala de variações no campo, que permite às raízes explorar zonas menos compactadas do solo. Além disso, a situação de campo é muito complicada, por causa da dinâmica do regime de água no solo (MAPFUMO et al., 1998).

A compactação pode mudar a morfologia e funcionalidade dos sistemas radiculares, por mecanismos biológicos, químicos ou físicos (TAYLOR e BRAR, 1991). A intensidade do enraizamento dos vegetais depende do sistema poroso do solo, merecendo atenção a magnitude deste, o tamanho dos poros, sua continuidade e o sentido (ELLIES et al., 1993).

Efeitos prejudiciais sobre organismos simbióticos, em decorrência do aumento da densidade do solo, foram relatados. NADIAN et al. (1996) verificaram redução da colonização de raízes de *Trifolium subterraneum* por micorrizas, em solos com compactação elevada. Resultados semelhantes foram apontados por SANTOS (1995), que verificou redução na colonização radicular de *Eucalyptus* por fungo micorrízico vesículo-arbuscular, e por BORGES et al. (1998), quanto à formação de nódulos efetivos na fixação de nitrogênio em plantas de soja.

ROSOLEM et al. (1994) verificaram, em trabalho com a cultura da soja, que a exploração de menor volume de solo, dada a presença de camadas compactadas, foi compensada pela melhor exploração desse volume, uma vez que, na camada superficial, a concentração de raízes passou de 0,89 para 1,91  $\text{cm cm}^{-3}$ . Dessa forma, seria esperado que o sistema radicular, embora menor, tivesse condições de melhorar a absorção por unidade de comprimento, mantendo a nutrição da planta, o que de fato aconteceu. O mesmo foi constatado em plantas de milho e centeio por SHIERLAW e ALSTON (1984), que verificaram maior absorção de fósforo por unidade de comprimento de raiz

em solos compactados do que naqueles sem compactação.

ABREU (1993), pesquisando a influência da profundidade de semeadura e da pressão de compactação do solo sobre a emergência de *Brachiaria brizanta* Staf cv. Marandarú, verificou que a compactação favoreceu a emergência das plântulas e população final em semeaduras superficiais, ao passo que, em maiores profundidades de semeadura (4 a 6 cm), o aumento da pressão de compactação resultou em decréscimo no peso de matéria seca das raízes, na área foliar e no peso de matéria seca da parte aérea.

Assim, 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 de raiz, o que justifica aumentos de produção de matéria seca da parte aérea de gramíneas e soja obtidos respectivamente por SILVA et al. (1992) e BORGES et al. (1988), nestas condições.

Segundo DIAS JÚNIOR e PIERCE (1996), um aumento da densidade do solo em consequência de uma redução no seu volume pode ou não provocar compactação adicional. Por isso, pesquisadores têm encontrado efeitos benéficos e adversos da compactação do solo. 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 ao solo de pressões maiores do que sua maior pressão sofrida no passado.

### **2.3.3. Nutrição fosfatada e potássica**

A disponibilidade de nutrientes para as plantas é afetada pela compactação do solo, já que os processos de fluxo de massa e de difusão, responsáveis pelo transporte de nutrientes até as raízes, são dependentes da condição física do solo, particularmente de sua densidade. Além de alterar o transporte de nutrientes no solo, a compactação pode alterar, indiretamente, a quantidade de nutrientes disponíveis, à medida que altera, também, a mineralização de compostos orgânicos, por afetar a aeração e a umidade do solo (SANTOS, 1995).

No que concerne ao mecanismo de suprimento às raízes, o potássio apresenta semelhança com o fósforo, pelo fato da difusão ser o mecanismo principal de transporte até a zona de absorção.

Para BARBER (1974), a difusão é o principal mecanismo de transporte do potássio da solução do solo às raízes, sendo responsável por 86% do seu suprimento, enquanto o fluxo de massa e a interceptação radicular representam 11 e 3%, respectivamente.

Em dois solos do Estado do Rio Grande do Sul, BECKER e MEURER (1986) verificaram que a difusão contribui com até 75% do K total absorvido no solo argiloso (Latosolo Roxo distrófico) e até 89,9% no solo de textura média (Latosolo Vermelho-Escuro distrófico). O mecanismo de fluxo de massa supriu no máximo 30,9% do K total absorvido pelas plantas, mesmo quando o teor de K em solução foi elevado.

No entanto, os teores de potássio na solução do solo podem atingir valores elevados, conferindo-lhe maior mobilidade em relação ao fósforo (COSTA, 1998), o que acontece de forma mais intensa em solos intemperizados com baixa CTC (capacidade de troca catiônica), cuja contribuição do fluxo de massa é maior.

Estudos anteriores em casa de vegetação e no campo encontraram que a compactação do solo reduziu a absorção e a concentração de P e K em plantas de milho e ervilha (CASTILLO et al., 1982; LOWERY e SCHULER, 1991; DOLAN et al., 1992). A compactação diminui o volume de solo explorado pelas raízes, podendo, assim, reduzir a absorção de P e K (DOLAN et al., 1992). Também BORGES et al. (1988) verificaram que, à medida que se aumentou a compactação, houve aumento de sintomas de deficiências de nutrientes em folhas de soja, semelhantes aos descritos para nitrogênio e potássio.

Segundo NOVAIS e SMYTH (1999), com a compactação, aumenta a participação de microporos, com o aumento da energia de retenção da água no solo; aumenta a viscosidade da água e a interação de íons de fosfato e superfície 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, que o adsorvem. Para que o P continue chegando até as raízes, doses cada vez maiores terão de ser aplicadas, de modo que



aumente a saturação de P nessas superfícies adsorventes e possibilite a manutenção da difusão em níveis pelo menos razoáveis, em termos de demanda pela planta.

RIBEIRO et al. (1987), estudando o efeito da interação água-densidade do solo sobre a difusão, medida pelo conteúdo de P no exsudato xilemático de mudas de eucalipto, em experimento com raízes subdivididas, obtiveram resultados que indicaram que a difusão de P no solo utilizado foi fortemente reduzido pelo decréscimo da umidade do solo ou pelo aumento de sua densidade.

A redução da infiltração de água no solo, causada pela compactação, diminui a quantidade de água absorvida pelas raízes, causando, assim, uma menor absorção de nutrientes por meio deste processo. No entanto, com o aumento da densidade do solo, a difusão aumenta até atingir um máximo e depois decresce. Esse aumento deve-se a uma maior aproximação entre as partículas do solo e as raízes, o que favorece a continuidade do filme de água e diminui a distância que o íon deve percorrer até alcançar a raiz. Entretanto, mesmo causando esse aumento na difusão, pelo fato de diminuir a proliferação de raízes, a compactação do solo diminui a disponibilidade de todos os nutrientes para as plantas (OLIVEIRA et al., 1998).

Trabalhando com doses de fósforo *versus* densidade do solo, RIBEIRO et al. (1985) observaram efeito prejudicial dos níveis de compactação na absorção de P por plantas de soja, não obtendo respostas às doses de fósforo quando a densidade do solo foi superior a  $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ . Para este valor de densidade, o impedimento mecânico foi mais sério do que a disponibilidade do elemento. DOLAN et al. (1992) também verificaram redução na absorção de fósforo e de potássio por plantas de milho em resposta a compactação do solo.

BORGES et al. (1988) observaram que a elevação da densidade inicial de 0,85 até a densidade de  $1,05 \text{ g cm}^{-3}$ , em um Latossolo Vermelho (72% de argila), causou maiores concentrações de P, K e Mg na parte aérea de soja, caindo para níveis de compactação maiores.

Não é fácil determinar exatamente a influência da compactação nos mecanismos de transporte de íons no solo, sendo que há experimentos que mostram que o transporte é aumentado e outros que indicam que é diminuído pela compactação.

## 2.4. Práticas de controle da compactação do solo

A compactação, geralmente, leva à redução da produtividade final da cultura e ao aumento dos custos de preparo do solo, pois exige práticas mecânicas de recuperação que demandam alto consumo de energia. Para prevenção e melhoria das condições dos solos submetidos à compactação em áreas florestais, existem técnicas culturais e mecânicas em que a viabilidade é função da situação.

Um processo que vem aumentando de importância é a utilização de espécies de plantas que possuem o sistema radicular com capacidade de penetração em solos compactados, melhorando, assim sua estrutura e aumentando seu teor de matéria orgânica. Segundo UNGER e KASPAR (1994), isto deve-se à enorme capacidade das raízes de exercer pressões (até 2500 kPa), sendo também verificado no sul do Brasil por DALLA ROSA (1981), com culturas de tremoço e colza.

Alguns trabalhos têm sido feitos com o objetivo de verificar a utilização de fertilizantes como um meio de controlar a compactação. Alguns autores demonstraram que, se houver a necessidade de subsolagem e se for feita uma adubação em profundidade, esta pode levar a um aumento da profundidade efetiva do solo, e a presença de raízes em maiores profundidades pode melhorar a estrutura do solo, combatendo assim a compactação (OLIVEIRA et al., 1998). Outras práticas culturais que podem melhorar as condições de solos compactados, são a rotação de culturas, com aproveitamento de restos culturais, e a adubação orgânica (UNGER e KASPAR, 1994; OLIVEIRA et al., 1998).

Um dos métodos mais direto para evitar a compactação está no conceito de “tráfego controlado” (TAYLOR, 1983). O controle do tráfego é mais uma medida de prevenção do que de combate à compactação. Este controle significa restringir a movimentação de veículos pesados a uma menor área, diminuindo os efeitos no desenvolvimento das culturas, ou mesmo desenvolvendo máquinas que realizem várias operações simultaneamente. Outra medida é restringir o tráfego a épocas em que o solo se encontre mais resistente à compactação, ou seja, quando ele estiver mais seco (SOANE et al., 1981; HAKANSSON et al., 1988; SCOPLE et al., 1992).

A preocupação com a susceptibilidade do solo à compactação reside na determinação de quando o solo está com umidade adequada para se executarem as operações motomecanizadas (DIAS JÚNIOR e PIERCE, 1996). Assim, a história de tensão e a curva de compressão do solo têm sido usadas para estimar a susceptibilidade do solo à compactação, bem como na modelagem da capacidade de suporte de carga (DIAS JÚNIOR, 2000).

As práticas mecânicas para a recuperação de solos compactados são a lavra, escarificação, gradagem, plantio direto, tratos culturais e a subsolagem. A subsolagem deve ser feita na época certa, para evitar que o subsolador forme uma camada compactada logo abaixo de seu raio de ação, camada esta conhecida como “pé-de-grade”.

Para tornar os efeitos da compactação menos severos a curto e médio prazo, recomenda-se usar a estratégia do manejo adequado da umidade do solo, dos níveis de fertilidade, bem como optar pela escolha de espécies mais resistentes aos efeitos da compactação. Características como maior resistência ao estresse de água e sistema radicular com maior poder de penetração são desejáveis nas plantas para tornar os efeitos da compactação menos severos (DIAS JÚNIOR, 2000).

Portanto, o melhor esclarecimento do crescimento de raízes e da dinâmica de transporte de P e K em solos compactados e seus efeitos sobre o crescimento da parte aérea de eucalipto, é importante para direcionar o planejamento do manejo florestal, minimizando as conseqüências adversas da compactação sobre o solo e o crescimento das plantas.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Solos

Foram utilizados dois solos com características texturais diferentes: Latossolo Vermelho (LV), da região de Sete Lagoas-MG (textura muito argilosa), e Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), da região de Três Marias-MG (textura franco-arenosa). As amostras de solo foram coletadas na camada superficial (0-20 cm), destorroadas, homogeneizadas, secas ao ar e passadas em peneira de malha de 2 mm, para posterior caracterização física e química.

Foi realizada a seguinte caracterização física dos solos: análise granulométrica (EMBRAPA, 1997); argila dispersa em água (EMBRAPA, 1997); equivalente de umidade, por centrifugação a 2440 rpm, durante 30 minutos; umidade residual (EMBRAPA, 1997); capacidade de campo, pelo método da coluna de solo; densidade de partículas (EMBRAPA, 1997); e densidade aparente da TFSA, pelo método da proveta (EMBRAPA, 1997) (Quadro 1).

Características químicas avaliadas: pH em H<sub>2</sub>O, com relação solo:solução 1:2,5 (DEFELIPO e RIBEIRO, 1981); carbono orgânico, pelo método Walkley-Black (DEFELIPO e RIBEIRO, 1981); fósforo disponível, por extração com Mehlich-1, e determinação colorimétrica após formação do complexo fosfomolibdico reduzido (BRAGA, 1980); fósforo remanescente, em equilíbrio, após agitação por 1 hora com solução de CaCl<sub>2</sub> 0,01mol L<sup>-1</sup> com 60 mg L<sup>-1</sup> de P (ALVAREZ V. et al., 2000); capacidade máxima de adsorção de

fosfato (NOVAIS e KAMPRATH, 1979; ALVAREZ V. e FONSECA, 1990); energia de adsorção de fósforo (NOVAIS e KAMPRATH, 1979); potássio trocável, por fotometria de chama, após extração com Mehlich-1 (DEFELIPO e RIBEIRO, 1981);  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  pelo extrator de KCl 1 mol L<sup>-1</sup> (VETTORI, 1969) e determinação por espectrofotometria de absorção atômica (DEFELIPO e RIBEIRO, 1981); acidez trocável (H + Al) pelo extrator acetato de cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup> a pH 7 (DEFELIPO e RIBEIRO, 1981) e titulação com hidróxido de sódio, usando fenolftaleína como indicador (EMBRAPA, 1997); soma de bases trocáveis (EMBRAPA, 1997); CTC (EMBRAPA, 1997) e percentagem de saturação por bases (EMBRAPA, 1997) (Quadro 1).

### 3.2. Ensaios

**Ensaio 1: Compactação versus doses de fósforo.** Neste ensaio, conduzido em casa de vegetação, foi utilizado um fatorial 3x4 (três densidades e quatro doses de fósforo) com quatro repetições, sendo as unidades experimentais distribuídas em delineamento inteiramente casualizado. As densidades testadas para o LV foram 0,91; 1,10; 1,30 g cm<sup>-3</sup> e 1,35; 1,55 e 1,75 g cm<sup>-3</sup> para LVA. As doses de fósforo foram 0; 150; 300 e 600 mg kg<sup>-1</sup> de P para o LV e 0; 100; 200 e 400 mg kg<sup>-1</sup> de P para o LVA.

**Ensaio 2: Compactação versus doses de potássio.** Neste ensaio, conduzido simultaneamente ao ensaio 1, foi utilizado um fatorial 3x4 (três densidades e quatro doses de potássio) com três repetições, com as unidades experimentais distribuídas em delineamento inteiramente casualizado. As densidades testadas para os dois solos foram as mesmas do ensaio 1. As doses de potássio foram 0; 50; 100 e 150 mg kg<sup>-1</sup> de K para os dois solos.

Os vasos utilizados nos dois ensaios foram tubos de PVC de 150 mm de diâmetro com fundo de isopor, com capacidade de 2,2 dm<sup>3</sup>, contendo um volume constante de solo de 2,0 dm<sup>3</sup>. Os solos receberam, na época da adubação, uma quantidade de MgCO<sub>3</sub> para fornecer 0,2 cmol dm<sup>-3</sup> de Mg<sup>2+</sup>.

Calcularam-se as quantidades de TFSA, que foram pesadas, de cada solo para ocupar o volume de 2 dm<sup>3</sup> e atingir as densidades correspondentes aos tratamentos a serem testados.

Quadro 1 – Características químicas e físicas de amostras dos solos estudados

Característica	LV	LVA
pH <sup>(1)</sup>	4,6	4,9
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) <sup>(2)</sup>	1,17	0,42
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) <sup>(3)</sup>	9,65	2,24
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) <sup>(2)</sup>	1,24	0,00
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) <sup>(2)</sup>	0,12	0,00
P (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>(4)</sup>	2,0	1,2
K <sup>+</sup> (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>(4)</sup>	41	35
m (%) <sup>(5)</sup>	44,5	82,4
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) <sup>(6)</sup>	1,46	0,09
CTC total (T) (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	11,11	2,33
CTC efetiva (t) (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	2,63	0,51
V(%) <sup>(7)</sup>	13,14	3,86
Carbono orgânico (dag kg <sup>-1</sup> )	3,38	0,56
P <sub>REM</sub> (mg L <sup>-1</sup> ) <sup>(8)</sup>	9,27	46,94
CMAP (mg g <sup>-1</sup> P) <sup>(9)</sup>	1,05	0,30
EAP (mg dm <sup>-3</sup> P) <sup>-1</sup> <sup>(10)</sup>	2,10	0,73
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	740	130
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	120	30
Areia grossa (g kg <sup>-1</sup> )	80	250
Areia fina (g kg <sup>-1</sup> )	60	590
Equivalente de umidade (%)	32,0	6,5
Argila dispersa em água (%)	16	4
Densidade aparente (g cm <sup>-3</sup> )	0,91	1,35
Densidade de partículas (g cm <sup>-3</sup> )	2,53	2,59
Umidade residual (%)	8,9	0,6
Capacidade de campo (%)	38,07	18,38
Classificação textural	Muito argilosa	Franco arenosa

<sup>(1)</sup> pH em água, relação 1:2,5

<sup>(2)</sup> Extrator KCL 1 mol L<sup>-1</sup>

<sup>(3)</sup> Extrator acetado de cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup> pH 7,0

<sup>(4)</sup> Extrator Mehlich-1

<sup>(5)</sup> Saturação por alumínio

<sup>(6)</sup> Soma de bases

<sup>(7)</sup> Saturação por bases

<sup>(8)</sup> Fósforo remanescente

<sup>(9)</sup> Capacidade máxima de adsorção de fosfato

<sup>(10)</sup> “Energia de adsorção” de fósforo.

Em seguida, realizou-se a adubação de manutenção e aplicação dos tratamentos específicos de P e K:

**Ensaio 1:** 100 mg kg<sup>-1</sup> de N; 150 mg kg<sup>-1</sup> de K ; 30 mg kg<sup>-1</sup> de S; 0,82 mg kg<sup>-1</sup> de B e 4 mg kg<sup>-1</sup> de Zn. As fontes dos elementos foram: (MgCO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>.Mg(OH)<sub>2</sub>.5H<sub>2</sub>O, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, ZnSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.SO<sub>4</sub>, KNO<sub>3</sub>, Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O, KCl e CaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O. Foi utilizado Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O como fonte de P na aplicação das doses de fósforo.

**Ensaio 2 :** 100 mg kg<sup>-1</sup> de N; 200 mg kg<sup>-1</sup> de P no LVA e 300 mg kg<sup>-1</sup> de P no LV; 30 mg kg<sup>-1</sup> de S; 0,82 mg kg<sup>-1</sup> de B e 4 mg kg<sup>-1</sup> de Zn. As fontes dos elementos foram: (MgCO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>.Mg(OH)<sub>2</sub>.5H<sub>2</sub>O, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, ZnSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.SO<sub>4</sub>, KNO<sub>3</sub>, Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O, CaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O. Foi utilizado KCl (além do KNO<sub>3</sub>) como fonte de K na aplicação das doses de potássio.

Foi utilizada uma solução de CaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O com o objetivo de nivelar o teor de cálcio em função da aplicação de fosfato monobásico de cálcio para a maior dose de fósforo.

Após a aplicação da adubação e homogeneização, os solos foram incubados por um período de 10 dias. Posteriormente, realizou-se a compactação dos solos nos vasos, utilizando-se uma prensa hidráulica. Para isso, dividiu-se o solo em 4 porções iguais que foram individualmente prensadas.

Foram semeadas aproximadamente 20 sementes de *Eucalyptus camaldulensis* por vaso. Oito a quinze dias após a emergência foi realizado o desbaste, deixando-se duas plantas por vaso.

Os ensaios foram conduzidos por um período de 100 dias após emergência das plantas, mantendo-se a umidade próxima à capacidade de campo, por meio de irrigações diárias com água destilada.

### **3.3. Colheita e características avaliadas**

Aos 100 dias da emergência, as plantas foram cortadas na altura do colo e a parte aérea separada em caule e folhas, sendo posteriormente acondicionadas em sacos de papel, colocadas em estufa com circulação forçada de ar a 65°C, para secagem até peso constante e posterior quantificação de matéria seca.

Realizou-se amostragem de solo em cada vaso, com auxílio de trado, para posterior análise química de fósforo e de potássio.

Foi retirada em cada vaso, entre as duas plantas, uma amostra de solo ( $136 \text{ cm}^3$ ) ao longo de todo o perfil do vaso com auxílio de um trado com 3,80 cm de diâmetro interno. A amostra foi submetida a lavagem em água corrente, sobre peneira de 0,250 mm de abertura (60 mesh) para retirada de raízes, as quais foram utilizadas para mensuração do comprimento radicular (L), pelo método da intercepção de linhas (TENNANT, 1975) e diâmetro médio (d) com auxílio de micrômetro óptico acoplado a microscópio ocular (média de 15 leituras por amostra).

Estimou-se a densidade radicular ( $\text{cm cm}^{-3}$ ) pela divisão do comprimento radicular (L) pelo volume de solo amostrado ( $136 \text{ cm}^3$ ). A superfície radicular (SR) foi calculada pela fórmula:  $SR = \pi dL$ . O valor obtido foi dividido pelo volume de solo amostrado, e o resultado expresso em  $\text{cm}^2 \text{ cm}^{-3}$  de solo. Nessa fórmula, pressupõe-se que a raiz apresenta forma cilíndrica.

Os vasos foram desmontados e o restante das raízes retiradas do solo mediante lavagem com água corrente, sobre peneira de 0,5 mm de abertura, e a seguir foram secas de modo idêntico à parte aérea.

Posteriormente, as amostras de tecido vegetal foram moídas em moinho tipo Wiley, de aço inoxidável, passadas em peneira de malha de 20 *mesh* (malhas polegada<sup>-2</sup>), acondicionadas em sacos de papel, para serem analisadas quimicamente.

Amostras do material vegetal, moído e homogeneizado, foram submetidas à digestão nítrico-perclórica (proporção 4:1) (JOHNSON e ULRICH, 1959), para determinar os teores de P, por colorimetria pelo método do azul de molibdênio, tendo ácido ascórbico como agente redutor (BRAGA e DEFELIPO, 1974); e de K, por fotometria de chama.

### **3.4. Índices de eficiência**

Neste trabalho, utilizou-se o índice proposto por SIDDIQI & GLASS (1981), definido pela expressão:  $E = W/C$  onde  $C = Q/W$ , sendo E = eficiência de utilização; W = matéria seca total; C = concentração do nutriente no tecido e Q = quantidade do nutriente na biomassa.



De posse do conteúdo dos nutrientes na planta (parte aérea + sistema radicular), segundo os tratamentos, foram calculadas as seguintes características:

a) Percentagem de recuperação do nutriente aplicado:

$$\frac{\text{Conteúdo do nutriente na planta fertilizada} - \text{Conteúdo do nutriente na testemunha}}{\text{Quantidade do nutriente aplicado, via fertilizante}} \times 100$$

b) Eficiência de utilização do nutriente (SIDDIQI e GLASS, 1981):

$$\frac{(\text{Matéria Seca total produzida})^2}{\text{Conteúdo total do nutriente na planta}}$$

c) Eficiência de absorção ou razão de eficiência radicular (BATTEN, 1992):

$$\frac{\text{Conteúdo total do nutriente na planta}}{\text{Superfície radicular}}$$

Os valores de superfície radicular ( $\text{cm}^2 \text{ vaso}^{-1}$ ) utilizados no cálculo de eficiência de absorção foram obtidos pela correção dos valores de superfície radicular no solo amostrado (SR) para o volume total de solo no vaso.

### 3.5. Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância, usando-se o programa SAEG (Sistema de Análise Estatística e Genética, EUCLYDES, 1983). Ajustaram-se os modelos de regressão linear, quadrático e quadrático base raiz quadrada. A escolha dos modelos foi feita testando-se os coeficientes dos modelos com base no quadrado médio do resíduo da análise de variância, aos níveis de 1% e 5% de significância pelo teste F ( $F = [t^2 \cdot \text{Quadrado Médio do Resíduo Independente da Regressão}] / (\text{Quadrado Médio do Resíduo da ANOVA} / \text{Número de Repetições})$ ). Finalmente, para dois ou mais modelos com

coeficientes significativos, a seleção foi feita com base no maior  $R^2$ .

Após ajuste das equações de regressão para estimar a produção como variável da dose de fósforo ou de potássio aplicada, foram determinadas as doses dos nutrientes responsáveis por 90% da produção máxima estimada de biomassa total.

Nos quadros de médias calculou-se a diferença mínima significativa (DMS) ao nível de 5% de significância pelo teste Tukey, comparando-se os níveis de compactação do solo dentro de cada dose do nutriente (compactação/dose).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. ENSAIO 1: COMPACTAÇÃO *VERSUS* DOSES DE FÓSFORO

#### 4.1.1. Produção de biomassa

Houve aumento da produção de matéria seca de raízes e da parte aérea com a elevação das doses de P, cujas curvas de resposta apresentaram, na maioria das vezes, forma quadrática (Figuras 1 e 2).

A produção de matéria seca foi negativamente afetada pelo aumento da compactação no LV (Figuras 1 e 2). A compactação restringe o crescimento radicular, interferindo na absorção de água e nutrientes. Porém, na maior densidade testada no LVA, as produções de biomassa de raiz e da parte aérea foram maiores do que na densidade média. Isso pode ser atribuído ao provável maior acúmulo de água e de nutrientes próximo ao sistema radicular, causado pelo arranjo dos agregados do solo, como sugerido por outros autores (SILVA et al., 1992; BORGES et al., 1988; PRIMAVESI, 1983).

Como a análise estatística mostrou significância da interação compactação *versus* doses de P, infere-se que para cada densidade do solo estudada, existe uma dose de fertilizante que proporciona melhor produção de biomassa.

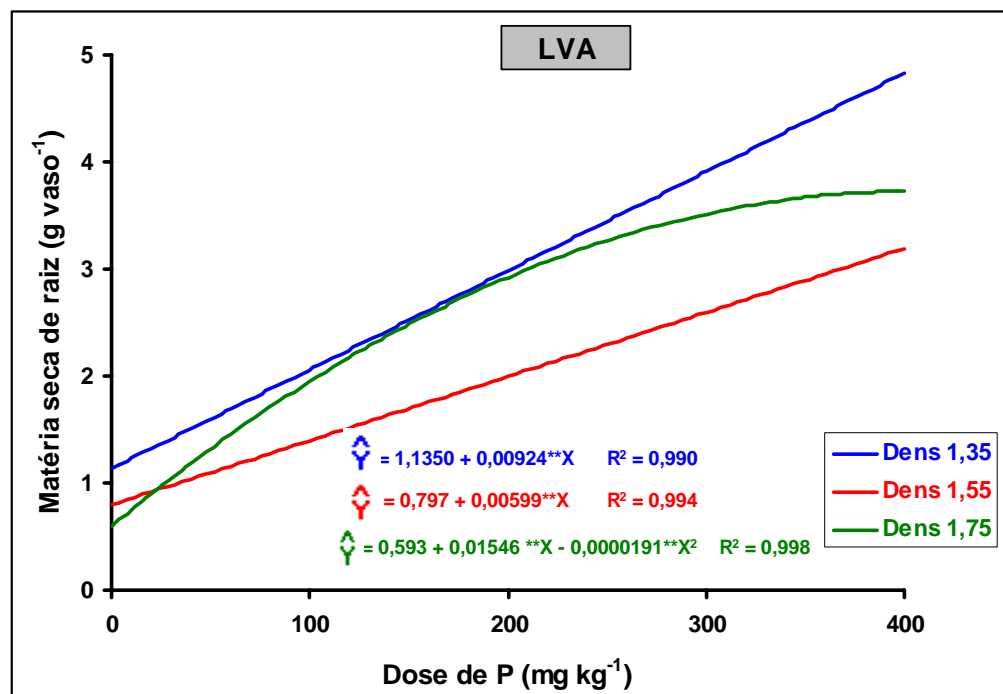
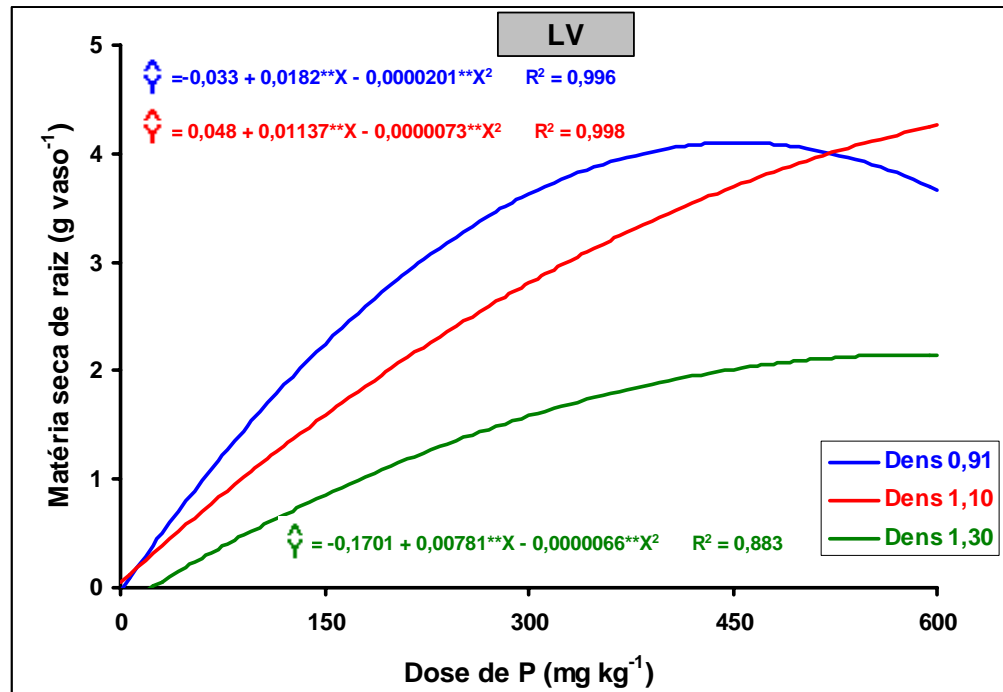


Figura 1 - Matéria seca de raiz de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de P aplicado.

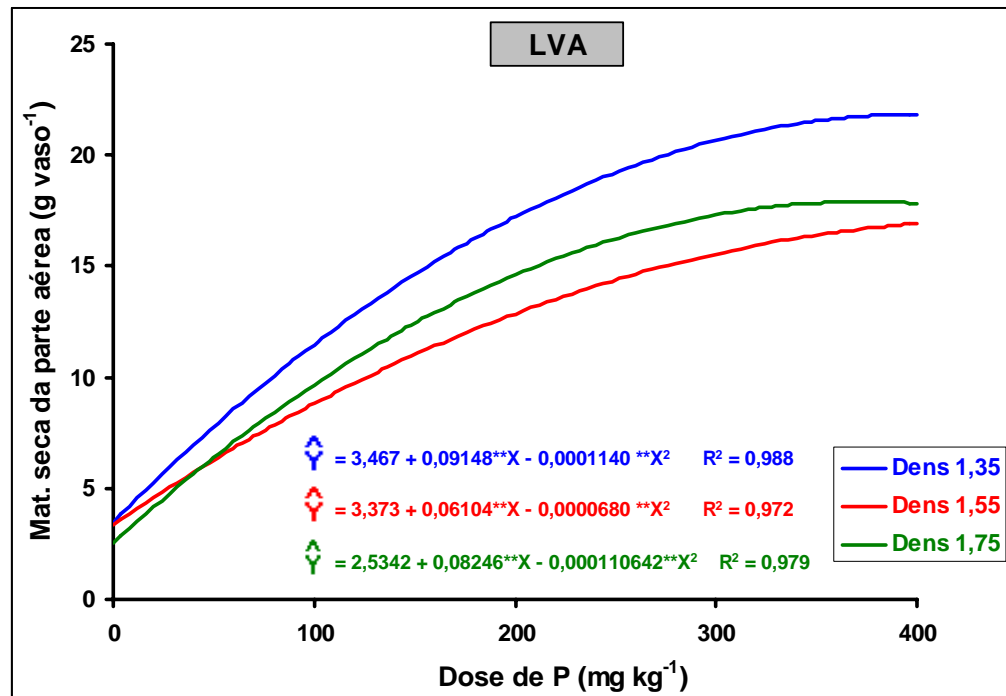
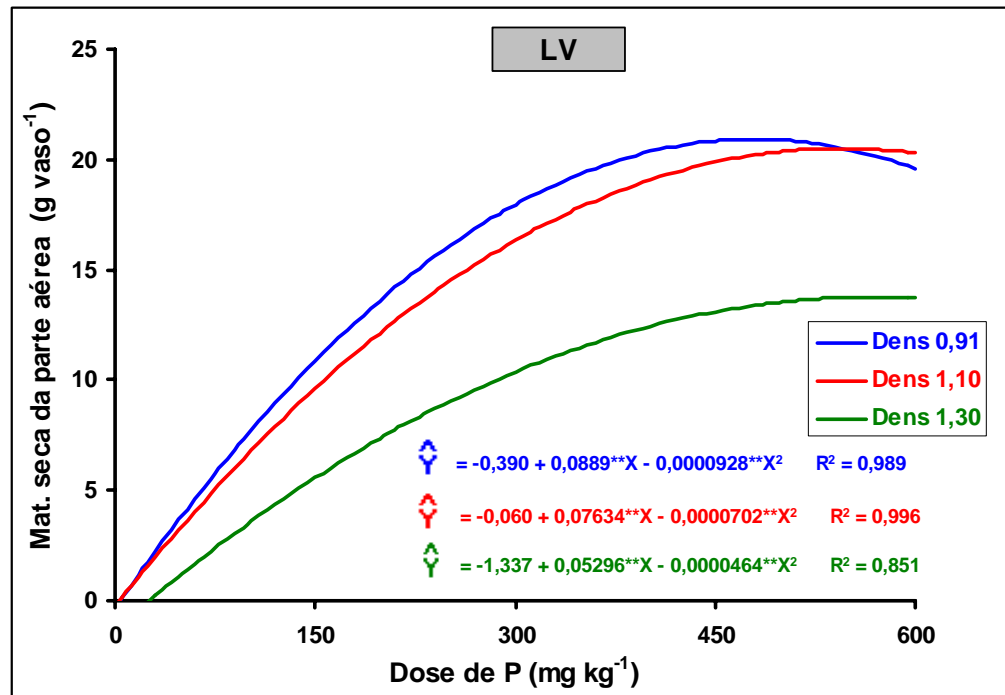


Figura 2 - Matéria seca da parte aérea de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de P aplicado.

A altura das plantas aumentou com as doses de P, apresentando comportamento semelhante, em relação à compactação do solo, ao verificado para produção de matéria seca da parte aérea (Quadro 2).

A relação raiz/parte aérea (R/PA) foi maior nos tratamentos com limitado suprimento de P (dose 0), pois nesta condição as raízes são drenos preferenciais, se comparadas com a parte aérea (Quadro 2). Resultados semelhantes foram observados por CHRISTIE e MOORBY (1975) em três espécies de forrageiras; por HALLMARK e BARBER (1984) em soja; e por FURTINI NETO (1994) em cinco espécies de eucaliptos.

A maior destinação de carbono às raízes sob baixo P, tanto para produção de biomassa quanto para respiração de manutenção, pode constituir fator limitante ao crescimento vegetal como um todo (ARAÚJO, 2000).

O crescimento da parte aérea das plantas pode ser limitado por um insuficiente suprimento de carboidratos quando uma alta proporção destas reservas é direcionada para as raízes; ou quando a taxa fotossintética é reduzida como resultado da redução da condutância estomática (MASLE e PASSIOURA, 1987). Assim, a partição de carboidratos para várias partes da planta provavelmente determina a ordem de sensibilidade dos componentes da planta à compactação (MAPFUMO et al., 1998).

Não havendo limitação de água e nutrientes, ocorre concentração de raízes nas camadas onde o crescimento é mais fácil, mantendo, com isso, a relação R/PA e prejudicando ao mínimo possível a absorção de água e nutrientes (MARSCHNER, 1995).

As doses de fósforo necessárias para obter 90% da máxima produção estimada de biomassa total não apresentaram grande diferença ao se considerarem os níveis de compactação. No LV, as doses ficaram entre 325,8 e 399,9 mg kg<sup>-1</sup> de P e no LVA entre 248,0 e 329,3 mg kg<sup>-1</sup> de P (Quadro 3). Apesar de não haver grandes variações nestas doses, o valor estimado correspondente a 90% da matéria seca total máxima variou para as densidades do solo, sendo esta variação da ordem de 57% para o LV e 24,3% para o LVA. Com relação ao sistema radicular, a diferença entre os extremos de densidades testadas chegam a 90,7% no LV e a 29,8% no LVA, o que reforça a importância da compactação no crescimento de raízes.

Quadro 2 – Relação raiz/parte aérea (R/PA) e altura de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, nas doses de P aplicado

Densidade do solo	Dose P	Relação R/PA	Altura da planta
g cm <sup>-3</sup>	mg kg <sup>-1</sup>		cm
<b>LV</b>			
0,91	0	0,35	5,5
	150	0,22	49,8
	300	0,20	72,0
	600	0,18	76,3
1,10	0	0,56	2,9
	150	0,19	50,6
	300	0,16	73,9
	600	0,21	77,3
1,30	0	0,63	2,4
	150	0,19	26,9
	300	0,15	66,8
	600	0,16	66,6
<b>DMS (5%)<sup>1/</sup></b>		0,22	6,5
<b>LVA</b>			
1,35	0	0,31	37,3
	100	0,18	62,0
	200	0,17	69,9
	400	0,22	77,0
1,55	0	0,23	39,1
	100	0,18	47,1
	200	0,14	61,1
	400	0,19	69,2
1,75	0	0,30	29,0
	100	0,17	60,5
	200	0,22	67,5
	400	0,21	69,1
<b>DMS (5%)<sup>1/</sup></b>		0,06	10,5

<sup>1/</sup> Diferença mínima significativa ao nível de 5% de significância (compactação/dose).

Quadro 3 – Produção de matéria seca de raízes, da parte aérea e total correspondente a 90% da máxima estimada; produção relativa total e doses de P necessárias para obter 90% da produção máxima de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades e doses de P aplicado

Densidade do solo	Produção de biomassa			Produção relativa	Dose de P <sup>1/</sup>
	Raízes	Parte aérea	Total		
g cm <sup>-3</sup>	-----g vaso <sup>-1</sup> -----			%	mg kg <sup>-1</sup>
<b>LV</b>					
0,91	3,68	18,81	22,49	100,0	325,8
1,10	4,02	18,62	22,17	98,6	388,1
1,30	1,93	12,40	14,32	63,7	399,9
<b>LVA</b>					
1,35	4,35 <sup>2/</sup>	19,58	24,18	100,0	288,0
1,55	2,87 <sup>2/</sup>	15,36	18,85	78,0	329,3
1,75	3,35	16,11	19,45	80,5	248,0

1/ Doses de P para a obtenção de 90% da produção máxima de biomassa total

2/ Correspondente a 90% da produção obtida com a maior dose utilizada (400 mg kg<sup>-1</sup> de P).

#### 4.1.2. Concentração de fósforo na planta

Para todas as densidades, nos dois solos, as concentrações de fósforo nos diferentes componentes da planta aumentaram com as doses de P aplicadas (Quadro 4). A concentração do nutriente nas folhas apresentou-se freqüentemente maior do que nos demais componentes da planta, especialmente no LV; já no LVA, a maior concentração alternou-se entre caule e folhas. Esse comportamento decorre do fato de serem as folhas os órgãos mais ativos da planta e de sua elevada capacidade de remobilização e redistribuição interna deste nutriente (MARSCHNER, 1995).

Os valores de concentração de fósforo observados nas plantas cultivadas no LVA foram superiores aos das plantas cultivadas no LV, o que reflete uma maior disponibilidade do nutriente na solução do solo de textura



arenosa, mesmo recebendo menores doses de adubação fosfatada.

Tendo a CMAP como medida do “fator capacidade de P” (FCP) (NOVAIS, 1977; MUNIZ et al., 1985, 1987; FABRES et al., 1987), verifica-se que o LVA (CMAP= 0,30 mg g<sup>-1</sup> P) apresenta maior “fator intensidade” (I), menor “fator quantidade” (Q) e menor FCP (Q/I) do que o LV (CMAP= 1,05 mg g<sup>-1</sup> P).

O FCP pode ser entendido como a resistência do solo a mudanças no fator intensidade (I) quando se põe ou se retira P do solo (Q). Quanto à fertilização de solos com diferentes valores de FCP, o aumento da concentração de P-disponível, em solos com alto FCP, irá requerer doses mais elevadas de P, em relação a solos com baixo FCP, ambos com o mesmo teor inicial de P-disponível (NOVAIS e SMYTH, 1999). Como o teor inicial de P-disponível no LV (2,0 mg dm<sup>-3</sup>) era praticamente igual ao do LVA (1,2 mg dm<sup>-3</sup>), compreende-se as menores concentrações de P nas plantas no LV, como resultado do menor aumento do P-disponível neste solo, após fertilização, em relação ao LVA.

A maior disponibilidade de P para as plantas cultivadas no LVA pode ser constatado pelos teores de fósforo disponível nos solos ao final do experimento (Quadro 4).

A difusão de fósforo é alterada pela textura do solo, como verificado por COSTA (1998), que constatou aumentos da difusão de P mais acentuados nos solos mais arenosos, quando se aumentou as doses de P, comparados com os menores acréscimos nos solos mais argilosos, mesmo recebendo doses bem mais elevadas do nutriente.

As alterações na absorção de fósforo, em consequência de características de solo que variam quanto à facilidade de ceder este elemento para planta, deverão levar a mudanças nas formas de sua reserva na planta (BIELESKI, 1973). Assim, segundo este autor, em condições de maior disponibilidade de fósforo, há acúmulo, na forma inorgânica (Pi), nos vacúolos, servindo de reserva. Outro modo alternativo de acumular o elemento na planta é, de acordo com BIELESKI (1973), via síntese de compostos de reserva como polifosfato e ácido fítico. Entretanto, ele considera que o nível de Pi no tecido é mais sensível à disponibilidade do elemento do que os níveis de várias frações orgânicas de fósforo na planta.

Quadro 4 - Teor de P no solo, concentração de P na raiz, folha e caule de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, nas doses de P aplicadas

Densidade do solo	Dose de P	P no solo <sup>2/</sup>	Componente da planta		
			Raiz	Folha	Caule
g cm <sup>-3</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	-----dag kg <sup>-1</sup> -----		
<b>LV</b>					
0,91	0	2,39	0,112	0,126	----- <sup>3/</sup>
	150	20,74	0,111	0,149	0,220
	300	49,23	0,130	0,157	0,163
	600	130,46	0,168	0,197	0,250
1,10	0	1,90	0,041	0,036	----- <sup>3/</sup>
	150	17,58	0,104	0,181	0,156
	300	41,97	0,115	0,172	0,102
	600	113,95	0,162	0,204	0,194
1,30	0	1,64	0,113	0,030	----- <sup>3/</sup>
	150	15,11	0,095	0,170	0,115
	300	34,52	0,118	0,214	0,116
	600	96,50	0,151	0,212	0,176
<b>DMS (5%) <sup>1/</sup></b>		5,42	0,05	0,05	0,08
<b>LVA</b>					
1,35	0	1,43	0,071	0,143	0,077
	100	36,07	0,146	0,231	0,334
	200	107,20	0,241	0,264	0,344
	400	189,60	0,278	0,421	0,356
1,55	0	0,87	0,066	0,127	0,069
	100	32,80	0,174	0,257	0,362
	200	86,70	0,220	0,415	0,362
	400	181,75	0,344	0,373	0,335
1,75	0	0,66	0,058	0,087	0,062
	100	31,62	0,138	0,210	0,333
	200	79,81	0,228	0,339	0,424
	400	208,44	0,343	0,406	0,430
<b>DMS (5%) <sup>1/</sup></b>		20,55	0,15	0,10	0,08

<sup>1/</sup>Diferença mínima significativa ao nível de 5% de significância (compactação/dose)

<sup>2/</sup> Extrator Mehlich-1

<sup>3/</sup> Produção de matéria seca de caule foi praticamente nula.

Deve-se, portanto, ao analisar a concentração de fósforo total em uma planta, entender que o valor encontrado pode, em condição de maior I (mais fósforo em solução) e menor Q/I (menor fator capacidade e menor energia de adsorção) deste elemento no solo, superestimar sua concentração crítica metabolicamente ativa por acrescentar-lhe grande contribuição das formas de reserva, principalmente o Pi. O contrário deverá acontecer em condições de menor valor de I e maior Q/I, o que corresponderia, na prática, geralmente, a um solo mais argiloso do que no primeiro caso (MUNIZ et al., 1985).

#### **4.1.3. Conteúdo de fósforo na planta**

Houve elevação do conteúdo de P na raiz e na parte aérea das plantas em resposta às doses de fósforo (Figuras 3 e 4).

Segundo COSTA (1998), quando se aumenta a dose de fósforo aplicada ao solo, ocorre aumento da difusão do elemento, devido à saturação progressiva da superfície de adsorção, o que resulta no aumento da concentração de P na solução do solo e conseqüente aumento da absorção do nutriente.

A compactação reduziu o acúmulo de P na planta, devido ao seu efeito na difusão de P e no crescimento de raízes e conseqüente redução na absorção de água e de fósforo (Figuras 3 e 4).

Isto confirma resultados de RIBEIRO et al. (1985), que observaram efeito detrimental do aumento da densidade aparente do solo na absorção de fósforo por plantas de soja; e de SHIERLAW e ALSTON (1984) e NADIAN et al. (1996), os quais verificaram que o conteúdo total de P foi altamente reduzido pela compactação do solo. De acordo com estes autores, isto é conseqüência direta do decréscimo no crescimento radicular e provavelmente no coeficiente de difusão de P.

Segundo NOVAIS e SMYTH (1999), a compactação aumenta a interação de íons de fosfato e superfície 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, que o adsorvem, o que resulta na redução da difusão do nutriente até a raiz.

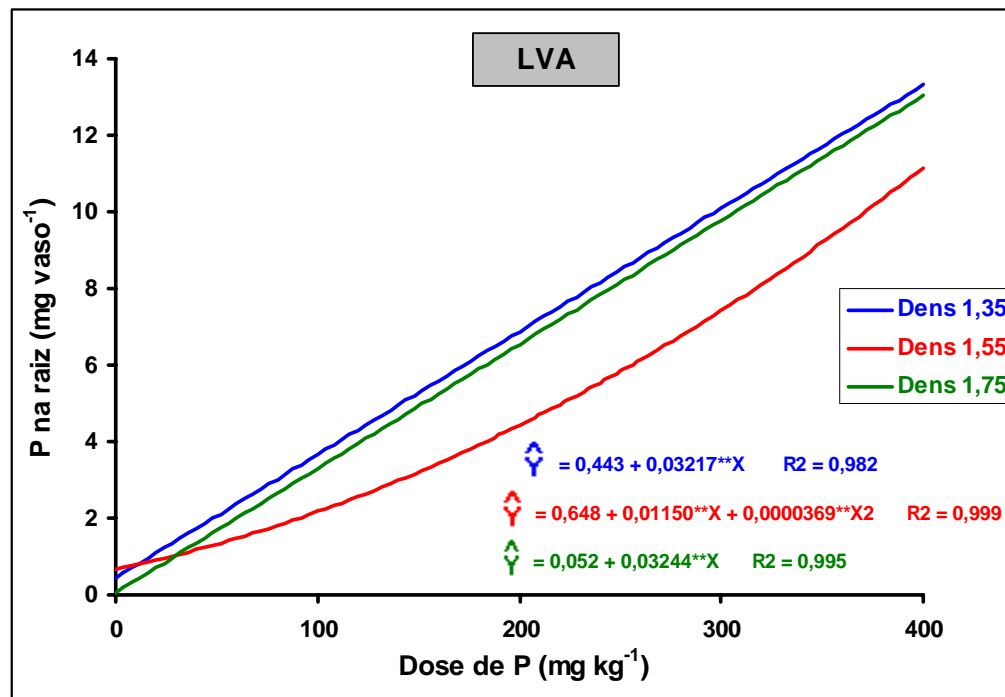
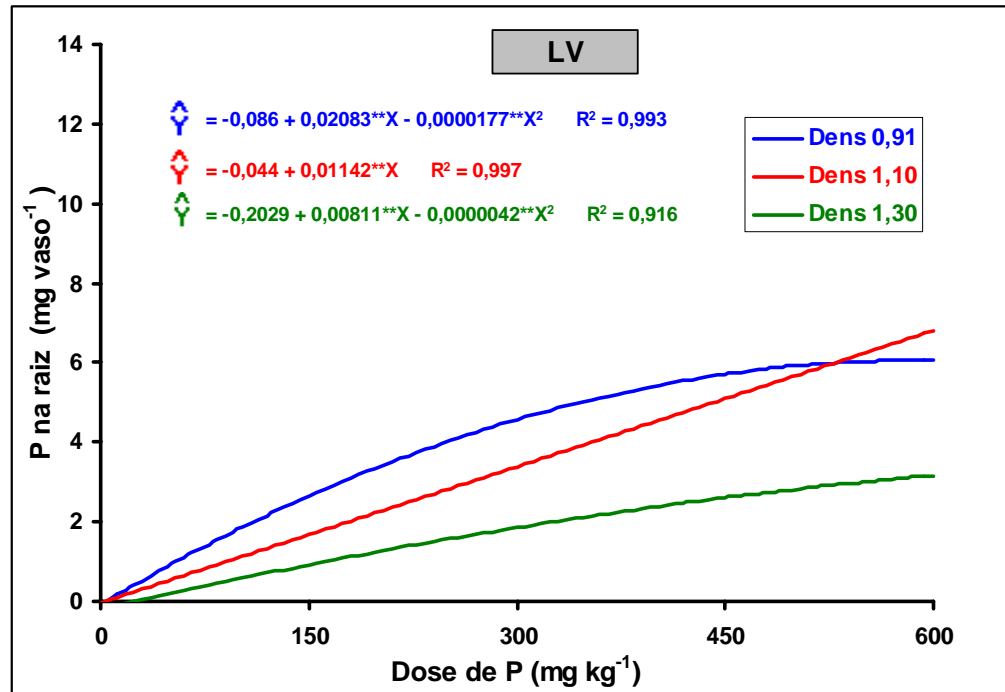


Figura 3 - Conteúdo de P na raiz de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de P aplicado.

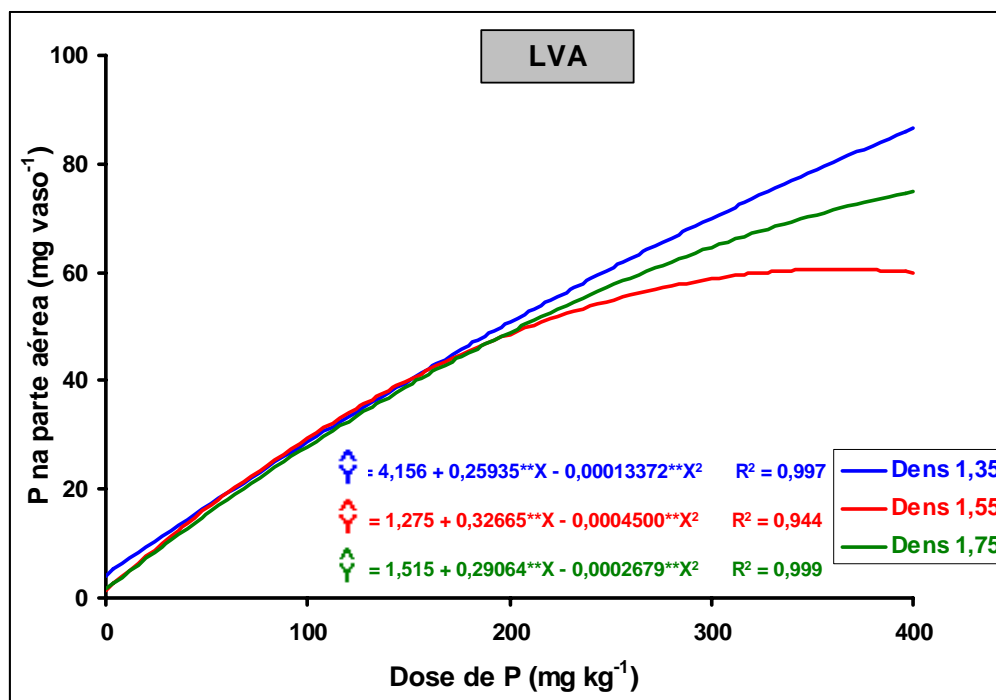
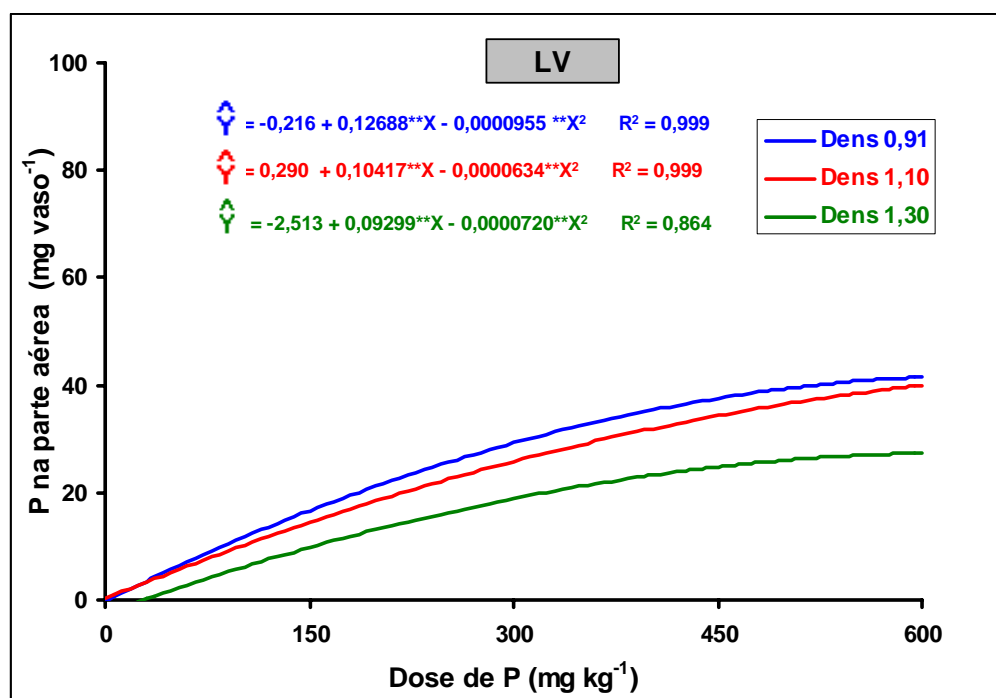


Figura 4 - Conteúdo de P na parte aérea de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de P aplicado.

O maior acúmulo de P nas plantas cultivadas no LVA em relação ao LV, é devido à maior absorção, resultado da maior disponibilidade do nutriente na solução do solo, como discutido anteriormente.

Quando os nutrientes estão prontamente disponíveis, podem ser absorvidos em quantidades que excedem suas exigências metabólicas. Se a maior absorção de um nutriente não se reflete sobre o crescimento da planta, o elevado conteúdo desse nutriente pode ser caracterizado como “consumo de luxo” (EPSTEIN, 1975).

Considerando-se que o ganho de biomassa das plantas cultivadas no LVA não acompanhou o aumento do conteúdo do nutriente, quando comparado com a mesma situação nas plantas no LV, pode-se supor que teria havido “consumo de luxo” do nutriente pelas plantas cultivadas no primeiro solo. Outra consideração que pode ser feita, é a de que a maior quantidade de fósforo absorvido pelas plantas no LVA pudesse ser armazenada em forma menos ativa metabolicamente (Pi-vacuolar). O Pi-vacuolar tem, fundamentalmente, função de reserva e pode retornar parcialmente ao citoplasma, se o requerimento metabólico da célula assim o exigir (BIELESKI e FERGUSON, 1983; FABRES et al., 1987).

Esse poder de estocar P que a planta tem, dependente da própria planta e de características do solo em que ela se encontra, poderá ser importante para a manutenção de seu crescimento quando, por uma razão qualquer, o transporte de P no solo diminui ou é interrompido por algum tempo (NOVAIS e SYMTH, 1999).

#### **4.1.4. Índices de eficiência**

A eficiência nutricional pode ser entendida como a capacidade do genótipo em absorver o nutriente do solo, distribuí-lo internamente e produzir biomassa com pequena quantidade de nutrientes (CLARK, 1983; GOODARD e HOLLIS, 1984).

Em termos fisiológicos, a eficiência nutricional pode ser resultante de vários mecanismos, como melhor geometria radicular, baixo Km, modificações na interface solo-raiz, boa distribuição interna e baixo requerimento funcional do nutriente (GRAHAM, 1984).

A mesma resposta quadrática observada na produção de biomassa pelas plantas de eucalipto, em relação ao suprimento de P, foi observada para a eficiência de sua utilização (Quadro 5). Assim, nas densidades testadas, as plantas apresentaram sensíveis aumentos na eficiência de utilização ao se aumentar o fornecimento de fósforo até doses ideais para a máxima produção de biomassa. Acima destas doses, ocorreu declínio na eficiência de utilização. Resultados semelhantes foram obtidos por SIDDIQI e GLASS (1981) em estudo com potássio, e por FURTINI NETO (1994) com fósforo.

É interessante observar o efeito prejudicial da compactação sobre a eficiência de utilização. No LV este índice apresentou valores maiores do que aqueles verificados no LVA, confirmando a provável ocorrência de “consumo de luxo” no LVA. Fica também evidente a influência da capacidade tampão de fósforo do solo na eficiência das plantas em utilizar este nutriente, conforme constatado por MUNIZ et al. (1987) e FABRES et al. (1987).

Quadro 5 – Eficiência de utilização de fósforo por plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, nas doses de P aplicado

Densidade do solo	Dose de P (mg kg <sup>-1</sup> )			
	0 <sup>1/</sup>	150 <sup>1/</sup>	300 <sup>1/</sup>	600 <sup>1/</sup>
	0 <sup>2/</sup>	100 <sup>2/</sup>	200 <sup>2/</sup>	400 <sup>2/</sup>
g cm <sup>-3</sup>	----- g <sup>2</sup> mg <sup>-1</sup> de P -----			
<b>LV</b>				
0,91	0,08	7,54	14,75	11,21
1,10	0,08	6,55	13,54	12,74
1,30	0,04	1,56	8,60	7,96
<b>LVA</b>				
1,35	4,45	5,10	7,51	7,06
1,55	4,53	3,32	4,20	5,70
1,75	3,55	5,46	4,92	5,36

1/ Doses de P para LV

2/ Doses de P para LVA.

A eficiência de absorção é uma característica importante na nutrição das plantas e pode ser avaliada pela razão de eficiência radicular (RER) de absorção de nutrientes ( $\mu\text{g cm}^{-2}$  de raiz).

Em todas as densidades testadas, houve aumento da RER de P com o aumento do fornecimento do nutriente (Figura 5). Segundo FURTINI NETO (1994), este comportamento não indica que o mecanismo de absorção seja menos eficiente nas menores doses de P, mas, provavelmente, que a menor disponibilidade de fósforo no solo limitou sua absorção pelas plantas.

RÖMER et al. (1989) também observaram aumento da eficiência de absorção de P por cultivares de trigo em níveis mais altos de fertilização. A grande demanda de P pela planta para suportar um rápido crescimento pode explicar este comportamento (LONERAGAN e ASHER, 1967).

Houve comportamento distinto da RER de P entre as densidades testadas em cada solo. Observa-se que uma leve compactação do solo ocasionou redução da RER de P, nos dois solos, provavelmente devido à redução da disponibilidade de P na solução do solo, em razão da maior adsorção de fósforo (NOVAIS e SMYTH, 1999). Por outro lado, no maior nível de compactação houve a maior RER de P, principalmente no LV. Neste caso, verifica-se relação negativa entre o crescimento radicular e a RER, o que pode indicar a existência de um mecanismo compensatório entre produção de biomassa radicular e taxa de absorção de P, como verificado por ARAÚJO (2000) em cultivares de feijoeiro. Esta observação confirma resultados obtidos por ROSOLEM et al. (1994) na cultura da soja, para a qual o sistema radicular no solo compactado, embora menor, apresentou aumento da absorção de P, K, N, Ca e Mg por unidade de comprimento; e por NADIAN et al. (1996), os quais verificaram aumento da absorção de P por unidade de comprimento de raiz com o aumento da compactação. No entanto, SHIERLAW e ALSTON (1984), verificaram que a máxima absorção de P por unidade de comprimento radicular ocorreu na densidade intermediária.

Para que atinjam os sítios de absorção das raízes, os nutrientes devem movimentar-se na água que segue o fluxo transpiracional da planta (fluxo de massa) ou pela difusão, proporcionada pelo gradiente de concentração estabelecido entre a zona próxima às raízes e a mais distante. Ambos os



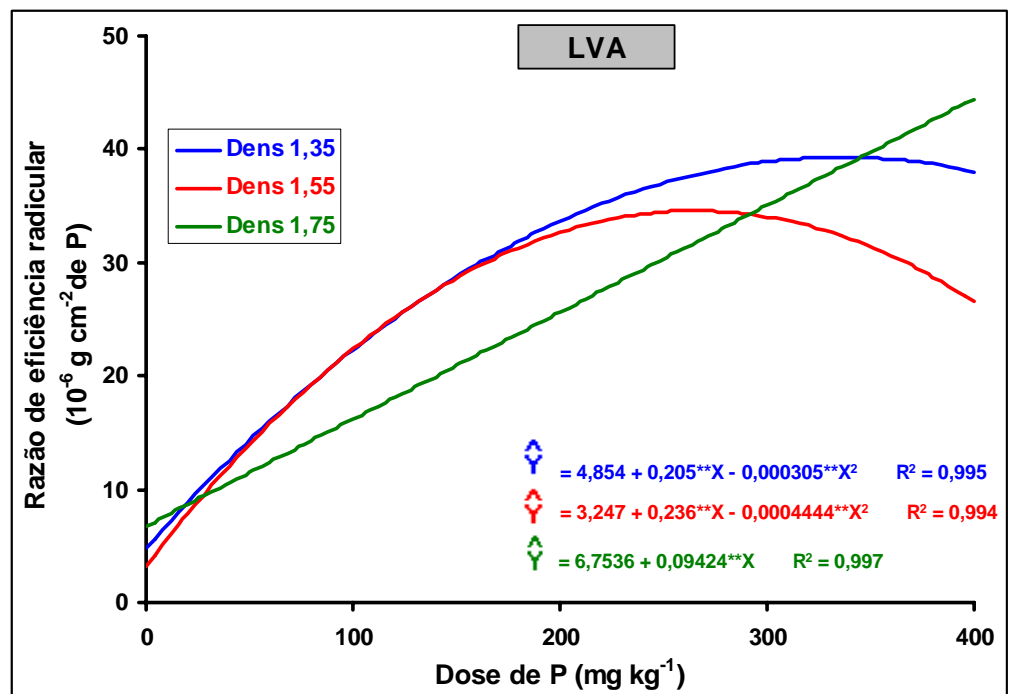
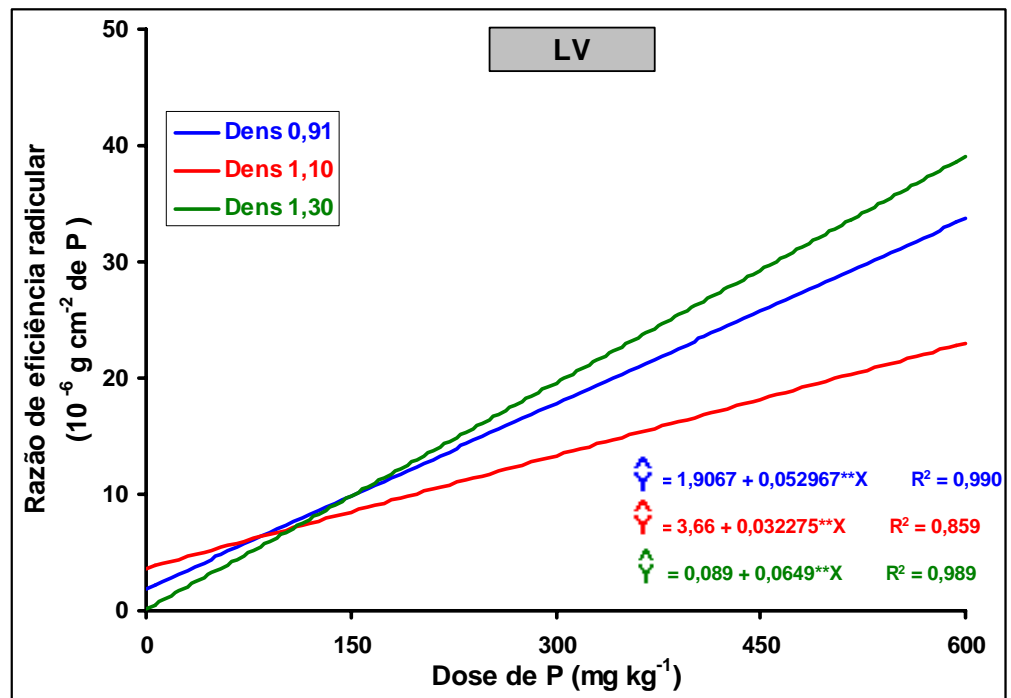


Figura 5 – Razão de eficiência radicular (RER) de P de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de P aplicado.

processos são dependentes do tipo do solo. Por isso, não é fácil determinar exatamente a influência da compactação nesses mecanismos de transporte de íons. Há experimentos que mostram que o transporte é aumentado e outros que indicam que é diminuído pela compactação.

PHILLIPS e BROWN (1965) e HIRA e SINGH (1977), investigando as causas do aumento de absorção de íons pelas plantas, em razão de pequenos aumentos na compactação, verificaram que, além do aumento da continuidade do fluxo de água, havia também uma redução na tortuosidade, facilitando tanto o processo de difusão quanto o de fluxo de massa. Entretanto, NOVAIS e SMYTH (1999) atribuem a redução da absorção com o aumento da compactação ao aumento da força de retenção de P entre partículas de argila aproximadas pela compactação.

O quadro 6 mostra a recuperação de P pelas plantas em resposta à compactação do solo e às doses de fósforo.

Observou-se baixa recuperação de P em todas as doses e níveis de compactação utilizados, variando de 0,88 a 10,01%, com menores valores no LV, por apresentar maior CMAP.

As taxas de recuperação de fósforo aplicado correlacionam-se inversamente com características do solo que refletem o fator capacidade (MUNIZ et al., 1985). Assim, estes autores verificaram menor taxa de recuperação de P pela planta, para maior capacidade tampão de fósforo.

Segundo FURTINI NETO (1994), em geral, a recuperação do P aplicado ao solo é menor que 10%, indicando que o nutriente teria assumido formas menos disponíveis às plantas.

Quando se aplica uma fonte solúvel de P num solo, freqüentemente mais de 90% do aplicado é adsorvido na primeira hora de contato com o solo, com fase lenta (meses) posterior (LOGANATHAN e FERNANDO, 1980; SINGH et al., 1983; GONÇALVES et al., 1985). A baixa recuperação pode também decorrer da baixa difusão do fósforo no solo dificultando sua chegada às raízes da planta (SCHENK e BARBER, 1979a; NOVAIS e SMYTH, 1999).

O efeito da compactação, reduzindo a recuperação de P, foi maior no LV, nas diferentes doses de fósforo. Estes resultados indicam que a difusão de P no LV foi fortemente reduzida pelo aumento da densidade do solo, apresentando efeitos significativamente mais pronunciados do que no LVA.

Quadro 6 – Recuperação de fósforo por plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, nas doses de P aplicado

Densidade do solo	Dose de P (mg kg <sup>-1</sup> )		
	150 <sup>1/</sup>	300 <sup>1/</sup>	600 <sup>1/</sup>
	100 <sup>2/</sup>	200 <sup>2/</sup>	400 <sup>2/</sup>
g cm <sup>-3</sup>	-----%-----		
	<b>LV</b>		
0,91	6,60	6,33	4,33
1,10	5,15	4,30	3,56
1,30	0,88	3,36	1,90
	<b>LVA</b>		
1,35	8,66	10,01	8,67
1,55	5,99	8,73	5,25
1,75	8,07	7,71	6,14

1/ Doses de P para LV

2/ Doses de P para LVA.

#### 4.1.5. Crescimento e características radiculares

A adaptação de plantas sob estresse de P ou de compactação do solo está associada ao crescimento e à morfologia radiculares, que apresentam sensibilidade às propriedades químicas e físicas do solo.

A compactação do solo reduziu a densidade de raízes nos dois solos, principalmente no LV (Figura 6). Isto confirma resultados de NADIAN et al. (1996), que verificaram decréscimo do comprimento de raízes de trevo em maiores níveis de compactação do solo; e de MISRA e GIBBONS (1996) em raízes de plântulas de eucalipto.

A inibição na extensão de raízes em solos compactados está relacionada a vários fatores. Em solos secos o aumento da resistência mecânica e o decréscimo do potencial de água no solo podem ser mais importantes. Em contrapartida, em solos úmidos, a deficiência de oxigênio e a acumulação de etileno e fitotoxinas são os fatores principais (MARCHNER, 1995).

A redução na expansão do sistema radicular, possivelmente, se dê em razão do acúmulo de CO<sub>2</sub> e da baixa difusão de oxigênio. Quando a concentração de O<sub>2</sub> é muito baixa, pode ocorrer redução na pressão de turgescência da célula ou, mesmo, maior resistência da parede celular ao alongamento (BORGES et al., 1997). Contudo, a importância da aeração está mais relacionada com solos argilosos, havendo menor efeito desta em solos de textura média ou arenosa, mesmo em altas densidades.

A limitada quantidade de nutrientes que chega às raízes, dada a menor disponibilidade de água no solo é que, segundo PRIMAVESI (1983), BORGES (1986) e OLIVEIRA et al. (1998), restringe o crescimento radicular em solos compactados.

Considerando o impedimento mecânico como fator principal, pode-se concluir que o crescimento radicular nessas camadas compactadas é condicionado pelo balanço entre as pressões externas (oferecidas pelo solo) e internas (exercidas pelas raízes). O que interessa, entretanto, não é a pressão máxima que as raízes podem exercer, mas sim, a pressão mínima oferecida pelo solo, a qual reduzirá a alongação de raízes (BORGES et al., 1988).

Verificou-se o aumento do diâmetro médio das raízes em função do aumento da compactação do solo (Figura 7).

Na camada compactada, as raízes sofrem uma série de modificações, tanto de ordem fisiológica quanto morfológica, tornando-se mais curtas, grossas, escamosas e com parede celular grossa, sugerindo maior taxa de respiração e maior resistência estrutural, ou seja, menor maleabilidade para se desviarem daqueles pontos de maior resistência no solo. Tais características são próprias de raízes que crescem em ambiente redutor, sendo que a compactação pode causar drenagem deficiente do solo e conseqüentemente situação de anaerobiose (BALIGAR et al., 1975; MATERECHERA et al., 1992; ALVARENGA et al., 1996; MISRA e GIBBONS, 1996).

Normalmente, quando crescem em solos com alta resistência, as raízes apresentam diâmetro aumentado (ROSOLEM et al., 1994). SHIERLAW e ALSTON (1984) e NADIAN et al. (1996) observaram aumento do diâmetro de raízes principais e laterais de primeira ordem, com o aumento da compactação do solo. Aumento no diâmetro radicular tem sido atribuído à ampliação do córtex, no qual as células tornam-se mais curtas na direção longitudinal mas

ficam largas na transversal, ou seja, a área de membranas por unidade de comprimento da raiz aumenta (BARBER, 1984; ATWELL, 1988).

O diâmetro de raízes é uma característica importante quanto à sua capacidade de penetração em solos compactados, uma vez que isto ocorrerá quando o diâmetro dos poros do solo for maior que o diâmetro radicular, ou menor, se esses não se apresentarem rígidos. Assim, a compactação do solo, ao aumentar o diâmetro radicular, pode reduzir o volume de solo explorado pela raízes (DOLAN et al., 1992).

Houve, em resposta às doses de fósforo, aumento da densidade e da superfície radiculares (Figuras 6 e 8) semelhante ao verificado para a produção de biomassa de raízes (Figura 1). Entretanto, as doses de P somente proporcionaram aumento do diâmetro radicular na densidade  $1,10 \text{ g cm}^{-3}$  no LV e redução apenas na densidade  $1,75 \text{ g cm}^{-3}$  no LVA (Figura 7).

A superfície radicular é considerada uma das melhores características para avaliar a absorção de nutrientes e água (SCHENK e BARBER, 1979a). De forma semelhante, a estimativa do comprimento de raízes por unidade de volume de solo (densidade radicular) é uma característica que proporciona excelente correlação com a água absorvida pelas raízes (BOHM, 1979). Portanto, ao promover o aumento da superfície e da densidade de raízes, a adubação fosfatada contribuiu diretamente com a absorção de água e nutrientes pelas plantas.

Fósforo pode também afetar a morfologia de sistemas radiculares de plantas (HALLMARK e BARBER, 1984). SCHENK e BARBER (1979b) mostraram que o baixo teor de P no solo resultou num menor raio radicular de milho, em relação a amostras de solo com alto P.

É interessante observar a alteração das curvas de resposta às doses de P, entre densidade e superfície radiculares, resultado da variação do diâmetro de raízes. Assim, verifica-se que, em solos compactados, o aumento do diâmetro proporcionou aumento da superfície radicular, havendo um efeito compensatório sobre a redução do comprimento de raízes, implicando numa possível recuperação da taxa de absorção de água e nutrientes.

NADIAN et al. (1996) propuseram que o aumento do diâmetro radicular pode aumentar a absorção de P por unidade de comprimento radicular em solos compactados. PETERSON e BARBER (1981) encontraram que, o

aumento do diâmetro radicular de 0,34 para 0,44 mm, aumentou o influxo máximo de K de 4,6 para 7,1  $\mu\text{moles cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ . BARBER (1984) sugeriu que isto pode ser devido à maior área de membrana plasmática dentro do córtex por unidade de área de superfície radicular.

Numa análise de sensibilidade de um modelo mecanístico, a taxa de crescimento da raiz e o raio radicular foram os fatores com maior influência na absorção de P em soja; os fatores associados ao solo, particularmente a concentração de P em solução, apresentaram maior sensibilidade do que os parâmetros cinéticos de absorção radicular (SILBERBUSH e BARBER, 1983).

Como a difusão de P no solo seria mais limitante do que a velocidade de absorção radicular, a eficiência de absorção de P estaria associada à maior produção de área radicular, e não aos maiores valores de influxo de P (ARAÚJO, 2000).

Em relação à densidade de raízes, houve menor magnitude de resposta às doses de fósforo pelas plantas cultivadas nos solos com maiores níveis de compactação, sugerindo que o impedimento mecânico é mais sério do que a disponibilidade do nutriente na restrição ao crescimento radicular.

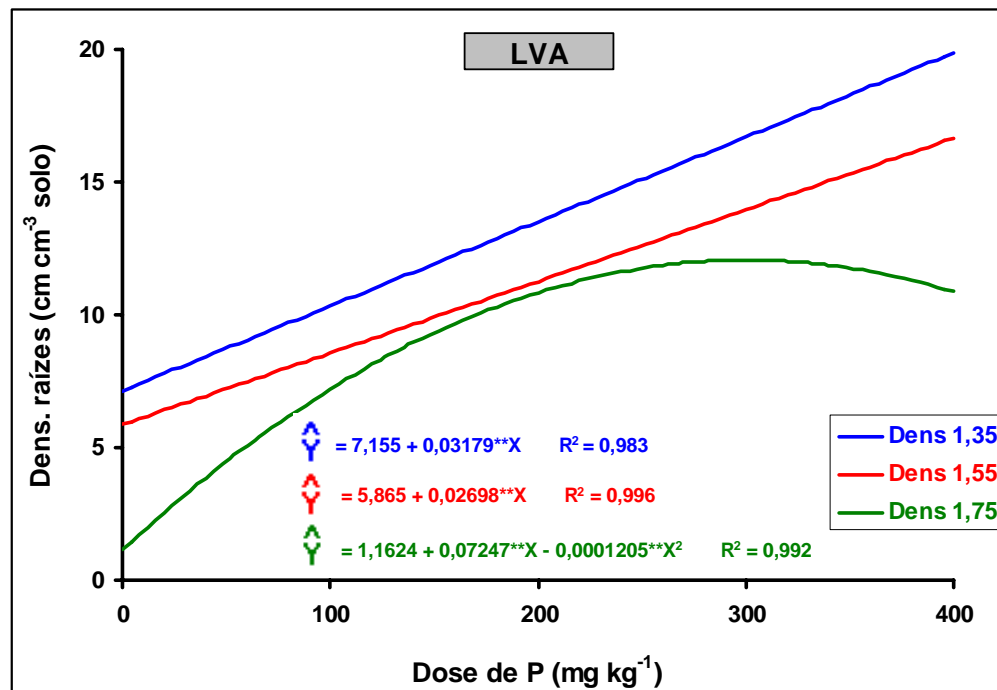
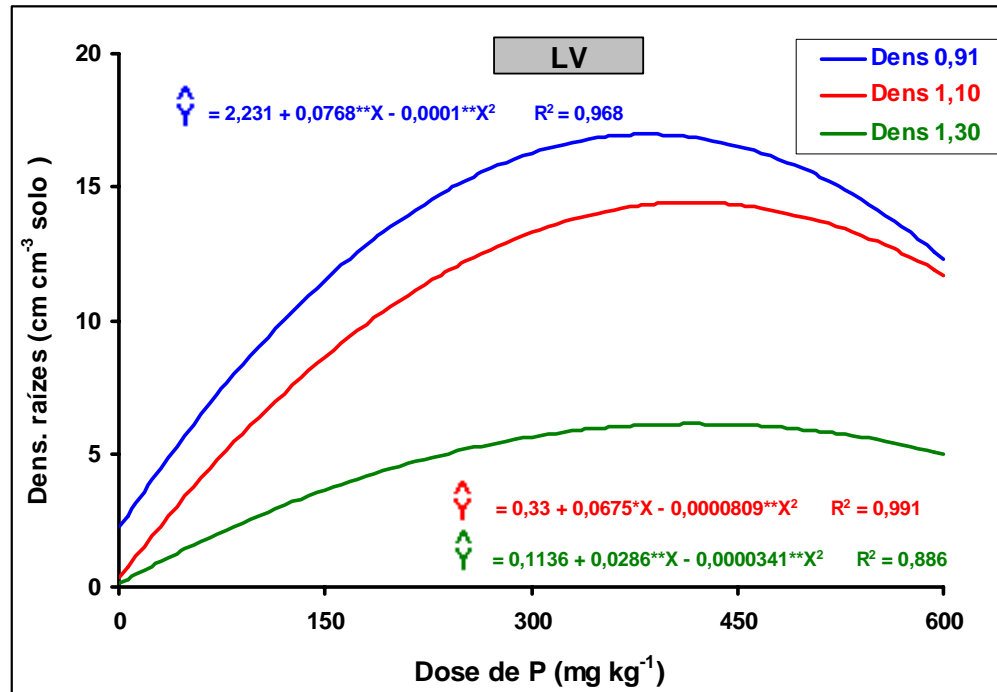


Figura 6 – Densidade de raízes de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de P aplicado.

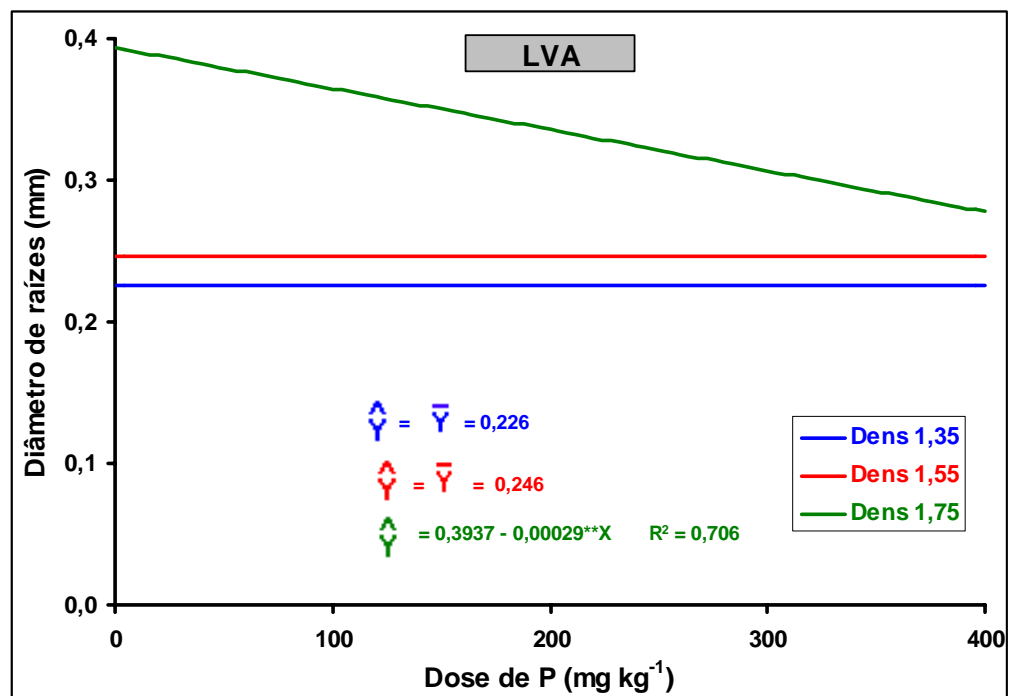
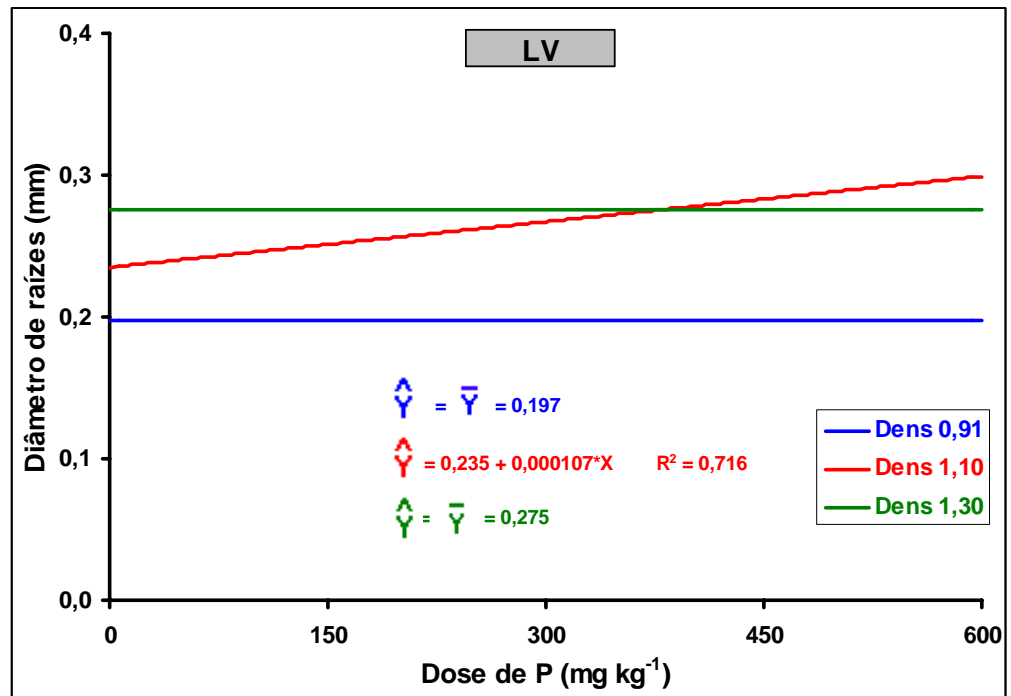


Figura 7 – Diâmetro de raízes de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de P aplicado.



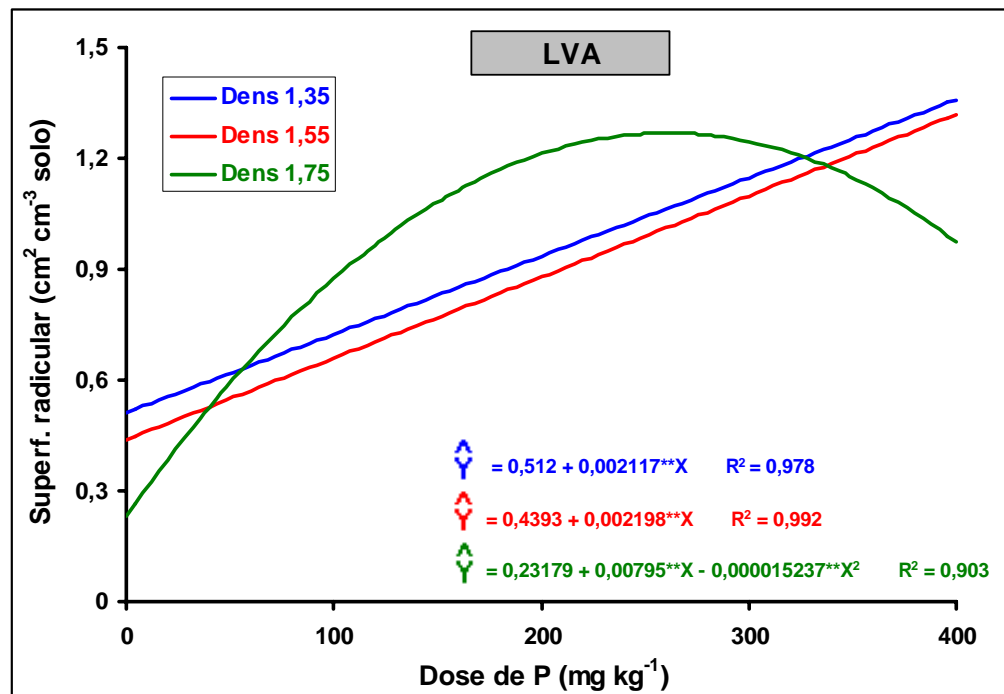
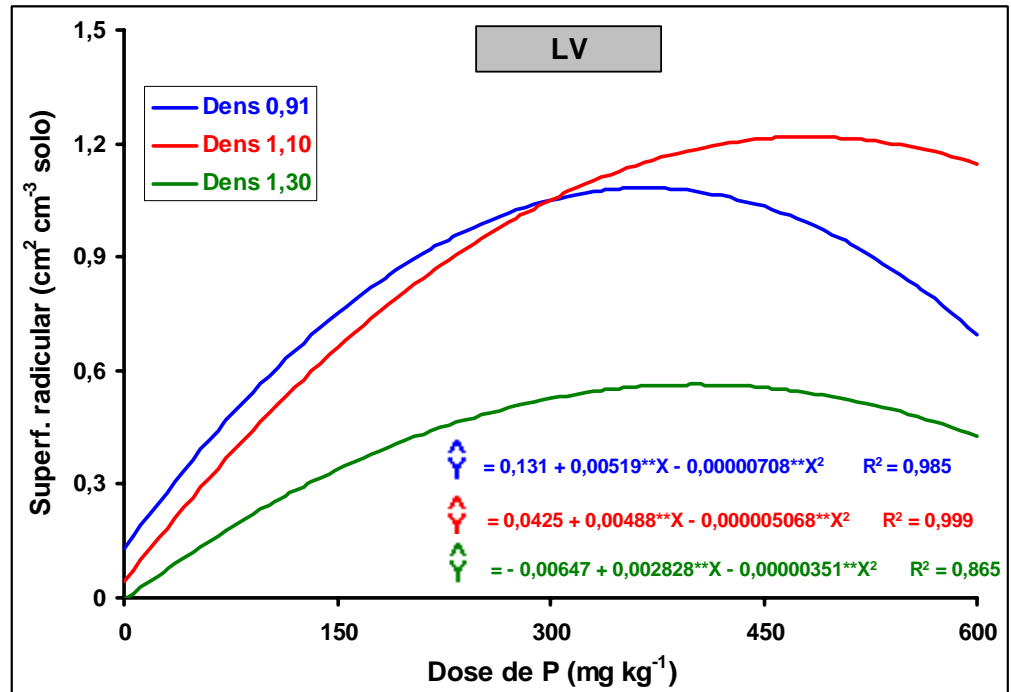


Figura 8 – Superfície radicular de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de P aplicado.

## 4.2. ENSAIO 2: COMPACTAÇÃO VERSUS DOSES DE POTÁSSIO

### 4.2.1. Produção de biomassa

As doses de K não afetaram significativamente a produção de biomassa de raízes nas densidades de 0,91 e 1,30 g cm<sup>-3</sup> no LV. Contudo, o comportamento foi quadrático em todas as densidades testadas no LVA e na densidade intermediária do primeiro solo (Figura 9).

Com relação à produção de biomassa da parte aérea, observa-se resposta praticamente nula às doses de potássio nas densidades de 0,91 e 1,10 g cm<sup>-3</sup> no LV e 1,35 g cm<sup>-3</sup> no LVA. No entanto, em densidades superiores (1,30 g cm<sup>-3</sup> no LV e 1,55 e 1,75 g cm<sup>-3</sup> no LVA) houve resposta positiva às doses de K (Figura 10).

A altura das plantas apresentou comportamento semelhante àquele observado na produção de biomassa da parte aérea (Quadro 7).

É interessante destacar que a resposta positiva às doses de potássio foi obtida nos tratamentos correspondentes aos maiores níveis de compactação do solo, ou seja, nesta situação a adubação potássica mostrou-se necessária para reverter ou amenizar os efeitos danosos ocasionados pela compactação, uma vez que o crescimento radicular foi reduzido (Figura 9), restringindo a exploração de um volume maior de solo.

A elevação da disponibilidade de K na solução do solo, ocasionada pela fertilização potássica, contribuiu para elevar a taxa de absorção do nutriente em quantidades satisfatórias para o crescimento das plantas.

Normalmente, a absorção de potássio pelas plantas superiores está estreitamente relacionada ao crescimento vegetativo, em especial, pela manutenção de um turgor adequado em tecidos meristemáticos, pelo carregamento do floema com produtos fotossintéticos e pela conversão de energia nos cloroplastos (MENGEL, 1982).

A tendência de ausência de resposta às doses de K, observada anteriormente nos tratamentos com menores densidades do solo, é atribuída ao teor inicial satisfatório de potássio nos solos estudados, ou seja: 41 e 35 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente, nos solos LV e LVA.

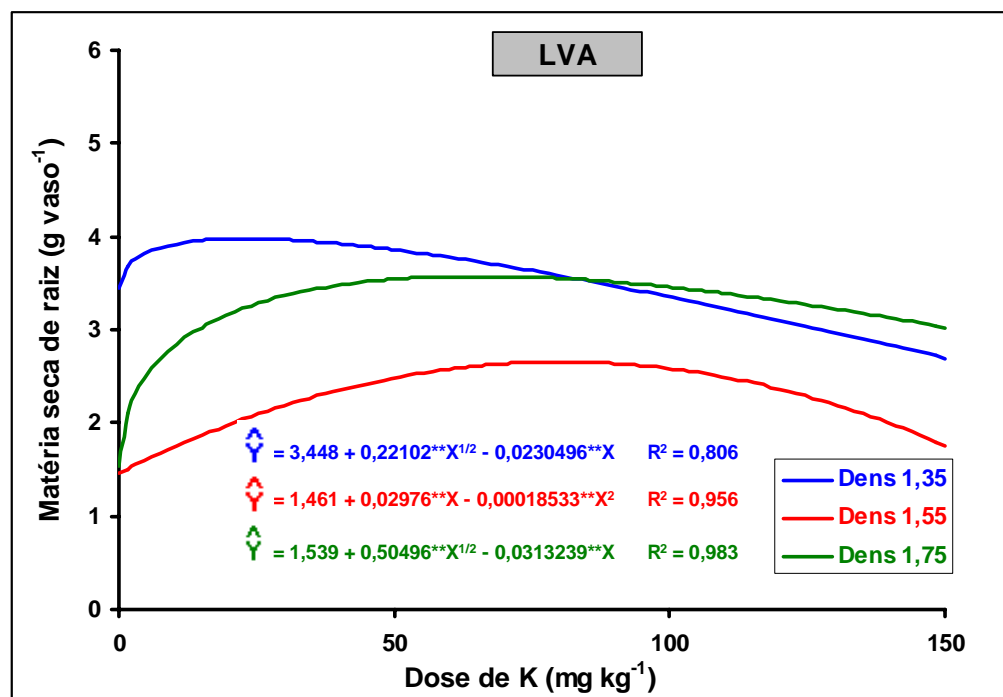
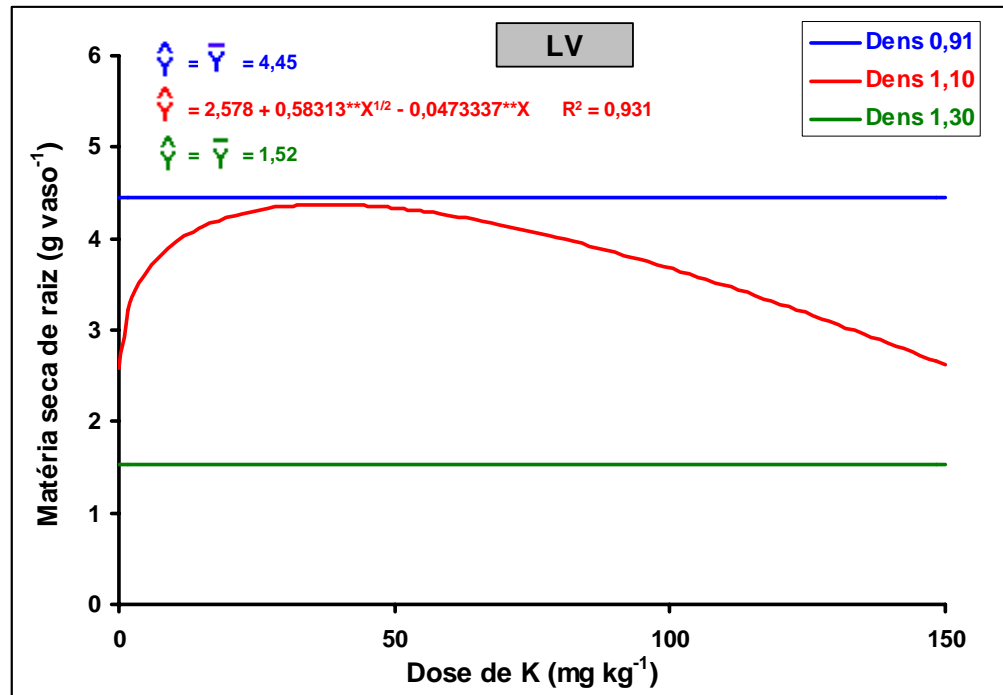


Figura 9 - Matéria seca de raiz de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de K aplicado.

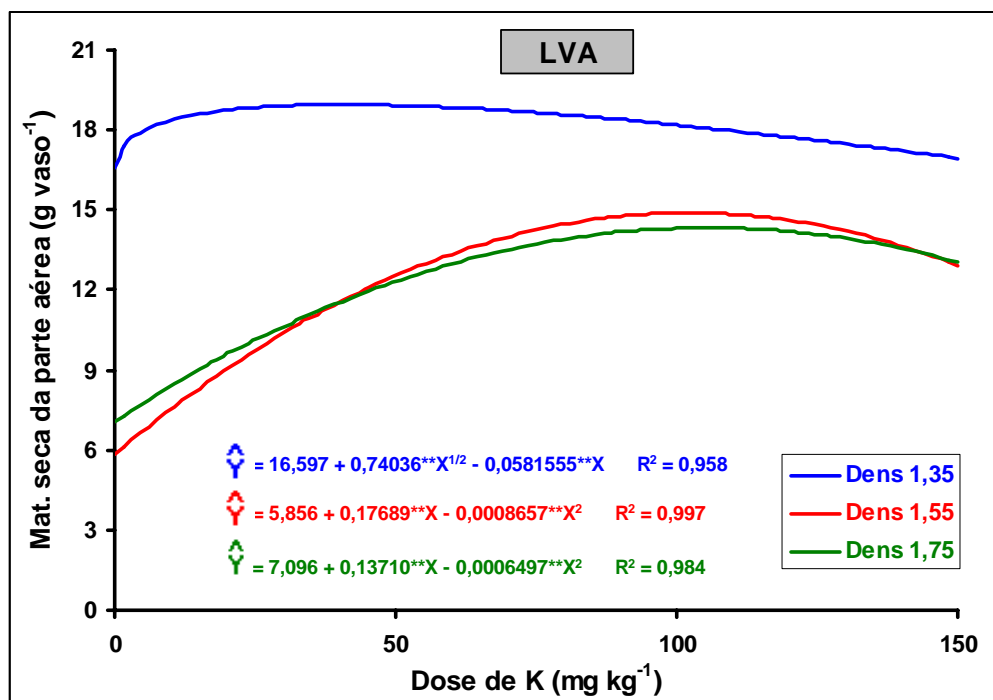
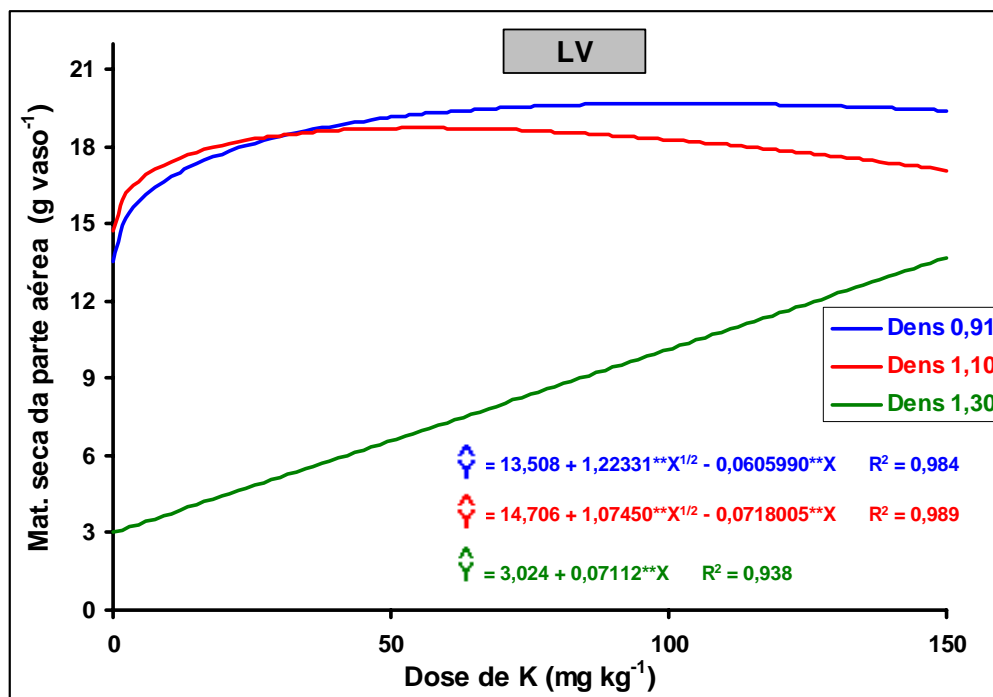


Figura 10 - Matéria seca da parte aérea de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de K aplicado.

Quadro 7 – Relação raiz/parte aérea (R/PA) e altura de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, nas doses de K aplicado

Densidade do solo	Dose de K	Relação R/PA	Altura da planta
g cm <sup>-3</sup>	mg kg <sup>-1</sup>		cm
<b>LV</b>			
0,91	0	0,32	67,33
	50	0,30	76,00
	100	0,19	82,00
	150	0,20	70,50
1,10	0	0,24	69,17
	50	0,24	63,17
	100	0,19	70,67
	150	0,16	60,50
1,30	0	0,18	37,00
	50	0,17	46,67
	100	0,24	49,17
	150	0,15	70,00
<b>DMS (5%)<sup>1/</sup></b>		0,12	17,00
<b>LVA</b>			
1,35	0	0,21	65,50
	50	0,22	73,67
	100	0,17	75,83
	150	0,17	66,83
1,55	0	0,26	44,00
	50	0,18	61,67
	100	0,19	66,17
	150	0,13	61,33
1,75	0	0,21	48,67
	50	0,31	64,33
	100	0,22	67,67
	150	0,24	67,50
<b>DMS (5%)<sup>1/</sup></b>		0,10	14,06

<sup>1/</sup> Diferença mínima significativa ao nível de 5% de significância (compactação/dose).

Estes teores são bem superiores ao nível crítico de  $10 \text{ mg dm}^{-3}$  estabelecido por NOVAIS et al. (1980), para o crescimento inicial de mudas de duas espécies de eucalipto em viveiro e ao valor de  $7 \text{ mg dm}^{-3}$  encontrado por BARROS et al. (1981b) para *E. grandis* em amostras de 10 solos.

No entanto, BARROS et al. (1981a), em um experimento de campo com eucalipto, observaram uma relação linear entre o crescimento e as doses de potássio aplicadas, indicando que maiores ganhos de crescimento teriam sido obtidos se tivessem sido usadas doses mais elevadas do nutriente, apesar dos  $26 \text{ mg dm}^{-3}$  existentes inicialmente no solo. Isto indicaria que a necessidade absoluta de potássio para o eucalipto aumenta com a idade da planta. Assim, solos com baixos teores de nutrientes ficam sujeitos à exaustão e, portanto, esses teores seriam insatisfatórios para a manutenção de novos incrementos (NOVAIS et al., 1986).

As doses de K, na maioria das vezes, não influenciaram estatisticamente os valores da relação raiz/parte aérea (R/PA) no LV e no LVA, havendo portanto, equilíbrio de crescimento entre a parte aérea e radicular (Quadro 7). Desta forma, não havendo limitação de água e nutrientes, a planta mantém a relação R/PA sem prejuízo na absorção dos mesmos (MARSCHNER, 1995).

Entretanto, observa-se que a compactação do LV promoveu, com freqüência, a redução da relação R/PA, devido à maior restrição ao crescimento de raízes em relação a parte aérea.

Utilizando-se as respectivas equações de regressão, obtiveram-se as doses de potássio correspondentes a 90% da máxima produção estimada de matéria seca (Quadro 8). Quanto à produção de matéria seca total, estas doses variaram no LV entre  $6,57$  e  $130,51 \text{ mg kg}^{-1}$  de K e entre  $0,35$  e  $57,56 \text{ mg kg}^{-1}$  de K no LVA. É interessante observar que as maiores doses de K são especialmente importantes nos maiores níveis de compactação. Este fato confirma que a elevação da concentração de potássio na solução do solo, ocasionada pela fertilização potássica, restabeleceu a absorção de K pela planta a uma magnitude suficiente para contornar a provável limitação do nutriente proporcionada pela compactação.

A produção estimada de 90% da matéria seca total, para as distintas densidades do solo, variou em mais de 52 e 27%, respectivamente no LV e

LVA, sendo que a compactação restringiu a produção de matéria seca de raízes em 192% no LV e 11% no LVA.

Quadro 8 – Produção de matéria seca da parte aérea, raízes e total correspondente a 90% da máxima estimada; produção relativa total e doses de K para obter 90% da produção máxima, de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, nas doses de K aplicado

Densidade do solo	Produção de biomassa			Produção relativa	Dose de K <sup>1</sup>
	Raízes	Parte aérea	Total		
g cm <sup>-3</sup>	-----g vaso <sup>-1</sup> -----			%	mg kg <sup>-1</sup>
<b>LV</b>					
0,91	4,00	17,71	22,02	100,0	10,38
1,10	3,94	16,85	20,75	94,2	6,57
1,30	1,37	12,32 <sup>2/</sup>	14,48 <sup>2/</sup>	65,8	130,51
<b>LVA</b>					
1,35	3,58	17,06	20,60	100,0	0,37
1,55	2,39	13,40	15,73	76,4	57,56
1,75	3,22	12,89	16,20	78,6	57,24

1/ Doses de K para obtenção de 90% da produção máxima de biomassa total

2/ Correspondente a 90% da produção obtida com a maior dose de K utilizada.

#### 4.2.2. Concentração de potássio na planta

A concentração de K variou muito entre as partes da planta, sendo as folhas o componente que apresentou a maior concentração do nutriente (Quadro 9). As folhas são os órgãos de metabolismo mais ativo das plantas, para onde os nutrientes remobilizados internamente são alocados (MENGEL e KIRKBY, 1987).

Houve aumento da concentração de potássio, nos diferentes componentes da planta, em função das doses de K aplicadas. Observa-se

também o aumento da concentração do nutriente com o aumento da densidade do LV, o mesmo não ocorrendo significativamente no LVA. A se julgar pelos baixos teores de K no LVA ao final do experimento (Quadro 9), verifica-se que, no período que antecedeu a colheita, houve redução da disponibilidade de K no solo, o que pode ter mascarado, por efeito de diluição, a concentração do nutriente na planta.

Alterações na densidade do solo afetam a tortuosidade da trajetória seguida pelo nutriente transportado. De acordo com WARNCKE e BARBER (1971), a difusão normalmente aumenta com o aumento da densidade do solo até um determinado valor, diminuindo rapidamente com novos acréscimos. Esses autores observaram que a tortuosidade foi reduzida com o aumento da densidade, ocorrendo redução do comprimento do caminho da difusão do elemento. Contudo, com densidade superior a  $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ , as partículas do solo começaram a tornar esse caminho mais tortuoso.

COSTA (1998), estudando a difusão de potássio em função da compactação e da umidade do solo, verificou que seus valores diminuíram em todos os níveis de umidade e nos três solos estudados, quando se promoveu a compactação.

As alterações na difusão de um íon quando um solo é submetido à compactação, aumentando-se a densidade aparente, são atribuídas a mudanças no fator de impedância, que envolve a tortuosidade (COSTA, 1998). O mesmo autor verificou que a umidade influenciou mais a difusão do que a compactação, o que mostra a importância da água no processo difusivo do potássio no solo, em condições de compactação.

#### **4.2.3. Conteúdo de potássio na planta**

O conteúdo de potássio na raiz apresentou, em resposta às doses de K, comportamento linear nos extremos de densidades testadas e quadrático na densidade intermediária, nos dois solos. Com respeito ao conteúdo de K na parte aérea, observou-se resposta quadrática às doses de K, com exceção nas densidades  $0,91$  e  $1,10 \text{ kg dm}^{-3}$  no LV, onde a resposta foi linear. O aumento do conteúdo de K foi devido, principalmente, ao aumento da concentração do nutriente no tecido vegetal (Figuras 11 e 12).



Quadro 9 - Teor de K no solo, concentração de K na raiz, folha e caule de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, nas doses de K aplicadas

Densidade do solo	Dose de K	K no solo <sup>2/</sup>	Componente da planta		
			Raiz	Folha	Caule
g cm <sup>-3</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	-----dag kg <sup>-1</sup> -----		
<b>LV</b>					
0,91	0	9,89	0,218	0,421	0,257
	50	11,36	0,308	0,542	0,354
	100	13,19	0,492	0,958	0,671
	150	15,02	0,593	1,075	0,913
1,10	0	7,88	0,290	0,563	0,400
	50	15,45	0,456	0,875	0,563
	100	16,97	0,700	1,375	0,983
	150	27,58	0,607	1,792	1,313
1,30	0	12,31	0,603	0,856	0,860
	50	19,49	0,738	1,556	1,088
	100	30,77	0,700	1,479	1,156
	150	44,87	0,740	2,260	1,353
<b>DMS (5%) <sup>1/</sup></b>		10,20	0,193	0,302	0,195
<b>LVA</b>					
1,35	0	2,96	0,275	0,667	0,442
	50	3,46	0,346	0,921	0,729
	100	4,69	0,650	1,819	1,290
	150	14,57	0,973	1,958	1,440
1,55	0	1,72	0,197	0,654	0,387
	50	3,01	0,508	1,175	0,971
	100	3,87	0,667	1,708	1,267
	150	10,75	0,833	2,167	1,413
1,75	0	2,29	0,192	0,538	0,350
	50	3,43	0,283	0,796	0,463
	100	3,81	0,517	1,458	1,108
	150	7,81	0,693	1,517	1,127
<b>DMS (5%) <sup>1/</sup></b>		4,02	0,200	0,260	0,270

<sup>1/</sup>Diferença mínima significativa ao nível de 5% de significância (compactação/dose)

<sup>2/</sup> Extrator de Mehlich-1.

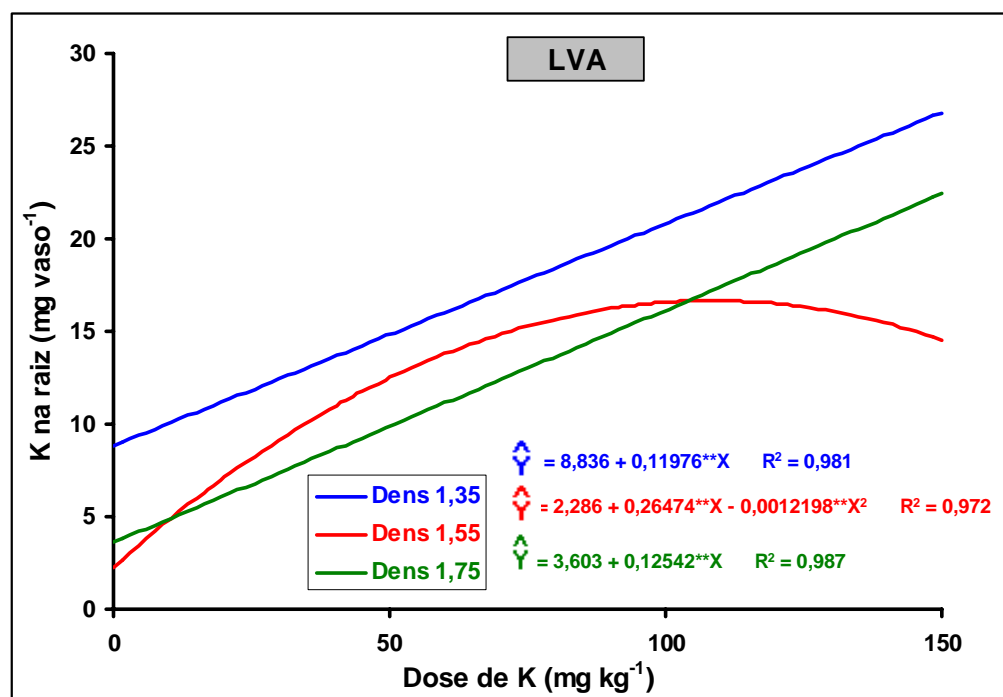
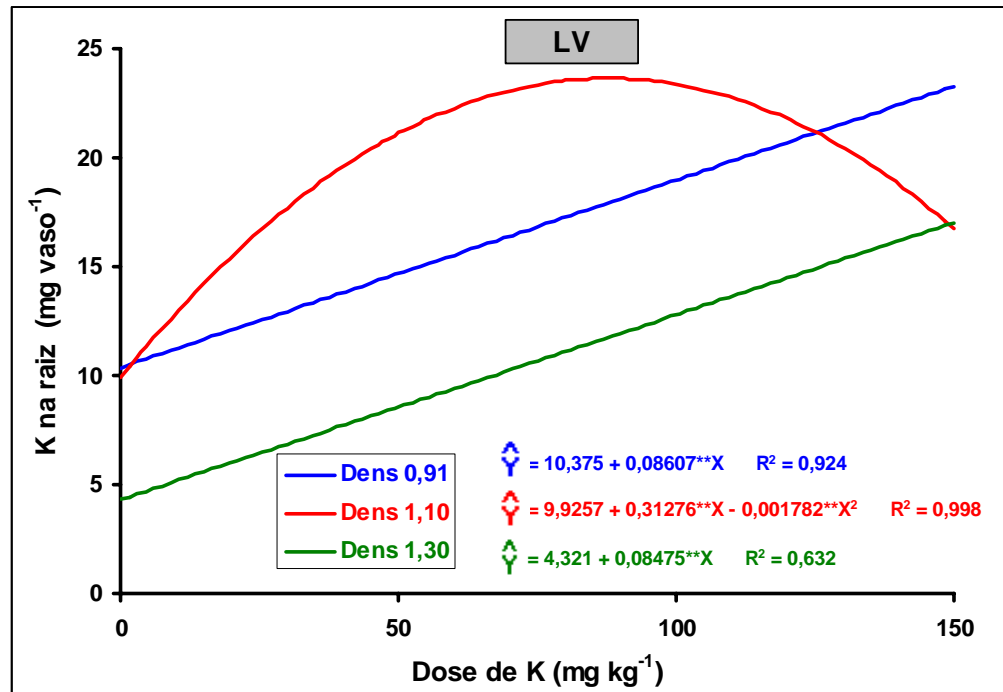


Figura 11 - Conteúdo de K na raiz de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de K aplicado.

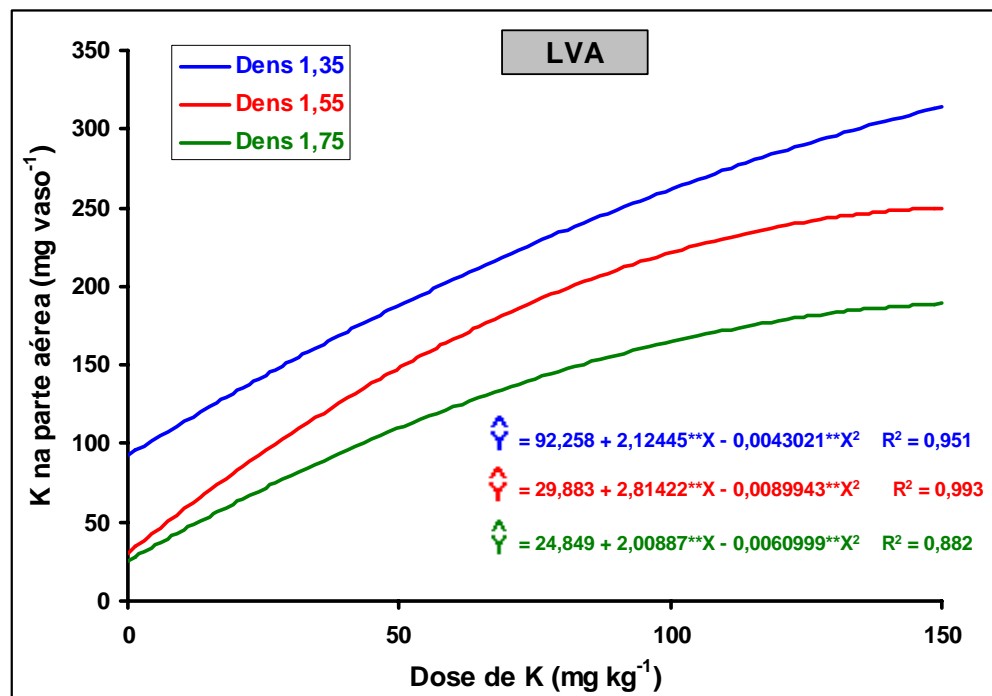
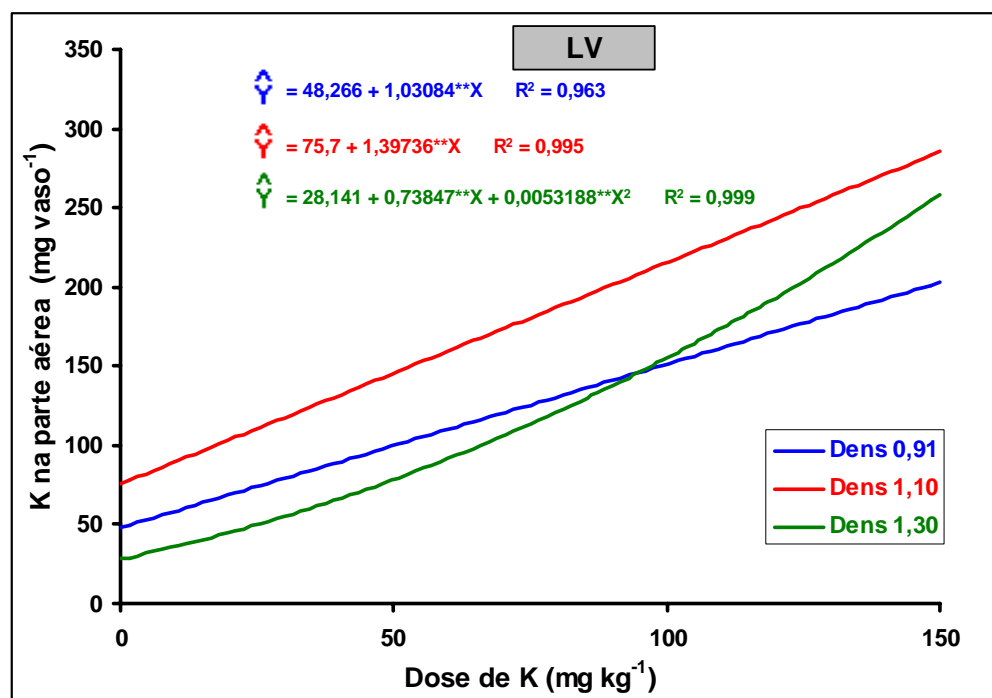


Figura 12 - Conteúdo de K na parte aérea de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) em diferentes densidades, em função das doses de K aplicado.

Verifica-se que, no LVA, houve redução do conteúdo de K na parte aérea com o aumento da compactação do solo (Figura 12). Isto pode ser atribuído a seu efeito no crescimento de raízes e conseqüente redução na absorção de água e K (DOLAN et al., 1992), e também em razão da redução da difusão de K no solo. WARNCKE e BARBER (1971) e COSTA (1998) verificaram que a elevada compactação do solo proporcionou redução significativa da difusão de K.

É interessante observar que, no LV, as plantas cultivadas na densidade média apresentaram conteúdo de K na raiz e na parte aérea superior àquele presente nas plantas cultivadas na menor densidade. Uma vez que, nas diferentes doses testadas, praticamente não houve diferença quanto à produção de matéria seca nestas densidades e que a concentração de K foi superior na densidade  $1,10 \text{ g cm}^{-3}$  em relação à densidade  $0,91 \text{ g cm}^{-3}$ , infere-se que o maior conteúdo de K na densidade  $1,10 \text{ g cm}^{-3}$  é resultado da maior absorção do nutriente.

BORGES et al. (1988) relataram que a absorção de nutrientes é favorecida pelo contato mais íntimo entre o solo, a solução e as raízes, devido a uma leve compactação do solo. Segundo WARNCKE e BARBER (1971), ocorre aumento da difusão de K no solo como conseqüência de uma pequena compactação do solo.

O maior nível de compactação, nos dois solos, acarretou decréscimo do conteúdo de K nos diversos componentes das plantas. Isto pode ser atribuído à redução da difusão K e ao efeito prejudicial sobre o crescimento radicular, resultando na redução da absorção e do conteúdo de potássio nas plantas.

Ao comparar o efeito das doses de potássio sobre o acúmulo de nutrientes nas plantas e sobre a produção de biomassa, infere-se que, com a aplicação de doses acima da correspondente à máxima produção, haveria “consumo de luxo” do elemento pelas plantas. Apesar de o “consumo de luxo” ser um mecanismo de conservação do nutriente no ecossistema (RITCHEY, 1982), reduzindo perdas de K por lixiviação e erosão, sua ocorrência não é interessante quando se pretende a otimização do fertilizante aplicado e quando se considera a exportação do nutriente do sistema na forma de biomassa (GALO, 1993).

#### 4.2.4. Índices de eficiência

Eficiência de utilização de nutrientes diz respeito à capacidade de utilizá-los para a síntese de biomassa (SIDDIQI e GLASS, 1981). Alta eficiência de utilização é sempre desejável, pois influencia diretamente a produtividade e a exportação de nutrientes através da colheita de biomassa (PAULA, 1995).

A eficiência de utilização de potássio foi maior nas duas primeiras doses de fertilização potássica (exceção na densidade  $1,30 \text{ kg dm}^{-3}$  no LV), apresentando em seguida declínio com o aumento das doses do nutriente (Quadro 10). Isto concorda com resultados de GALO (1993), que verificou em experimento no campo, com eucalipto, que a eficiência de utilização de potássio para a produção de tronco e de copa diminuiu com a elevação da dose do nutriente aplicada; e de SILVA et al. (1996) em espécies florestais nativas, cuja eficiência de utilização foi reduzida com o aumento da disponibilidade de K.

Como o teor inicial de K nos solos era relativamente alto ( $41$  e  $35 \text{ mg dm}^{-3}$ , respectivamente no LV e no LVA), os valores observados para eficiência de utilização encontram-se no pico já na dose zero de fertilização. Esta consideração está de acordo com resultados de SIDDIQI e GLASS (1981), que relataram tendência quadrática na eficiência de utilização de potássio, o que foi atribuído ao fato de que ambas as curvas, tanto a de crescimento quanto a de atuação enzimática, serem hipérbolas retangulares.

O comportamento diferencial observado na densidade  $1,30 \text{ g cm}^{-3}$  no LV é devido ao efeito da compactação, que proporcionou elevada queda na produção de biomassa em menores doses, havendo, porém, recuperação da produção com a aplicação de maiores doses de K, sendo que, para as demais densidades, neste solo, as doses de K praticamente não alteraram a produção de matéria seca da parte aérea (Figura 10).

A restrição à produção de biomassa, proporcionada pela compactação do solo, levou à redução da eficiência de utilização de potássio, sendo este efeito observado com mais clareza no LV.

A se julgar pelos maiores valores de eficiência de utilização no LV em relação ao LVA, pode-se sugerir a ocorrência de maior “consumo de luxo” no LVA, e isso aponta diferença de comportamento entre solos.

Em relação à razão de eficiência radicular (RER) de K, observa-se que houve aumento desta com a aplicação das doses de K, em todas as densidades nos dois solos (Figura 13). Este comportamento reflete o aumento da disponibilidade do nutriente na solução do solo em função da fertilização potássica.

Quadro 10 – Eficiência de utilização de potássio por plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, nas doses de K aplicado

Densidade do solo	Dose de K (mg kg <sup>-1</sup> )			
	0	50	100	150
g cm <sup>-3</sup>	-----g <sup>2</sup> mg <sup>-1</sup> de K-----			
	<b>LV</b>			
0,91	5,53	5,63	3,08	2,45
1,10	3,97	3,32	1,84	1,35
1,30	0,48	0,47	1,14	0,82
	<b>LVA</b>			
1,35	3,63	3,03	1,43	1,19
1,55	1,49	1,52	1,22	0,83
1,75	2,02	2,68	1,53	1,28

A RER de K no LV apresentou valores crescentes em função do aumento da densidade do solo, em consequência da redução do crescimento radicular e da tendência de aumento do conteúdo de K na planta, proporcionados pela compactação do solo. Entretanto, foi verificado efeito contrário no LVA, havendo decréscimo da RER de K com o aumento da densidade do solo. A deficiência final de K no LVA (Quadro 9), os maiores valores de conteúdo de K nas plantas cultivadas em menores densidades do solo (Figura 12) e os maiores valores de superfície radicular nos tratamentos com maiores níveis de compactação (Figura 16) ajudam a compreender esta mudança de comportamento.

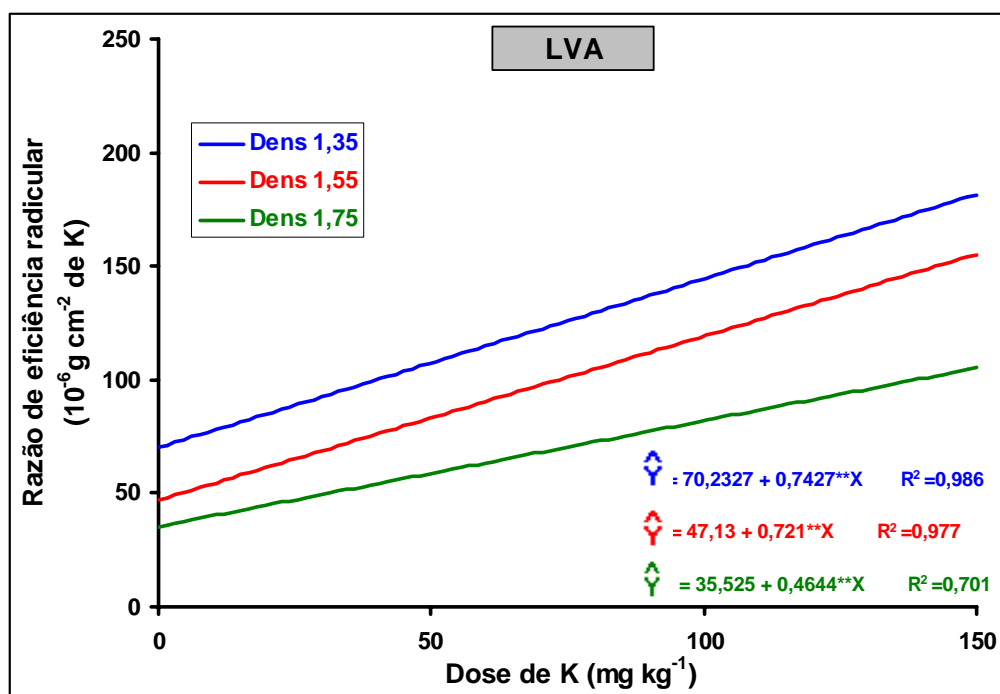
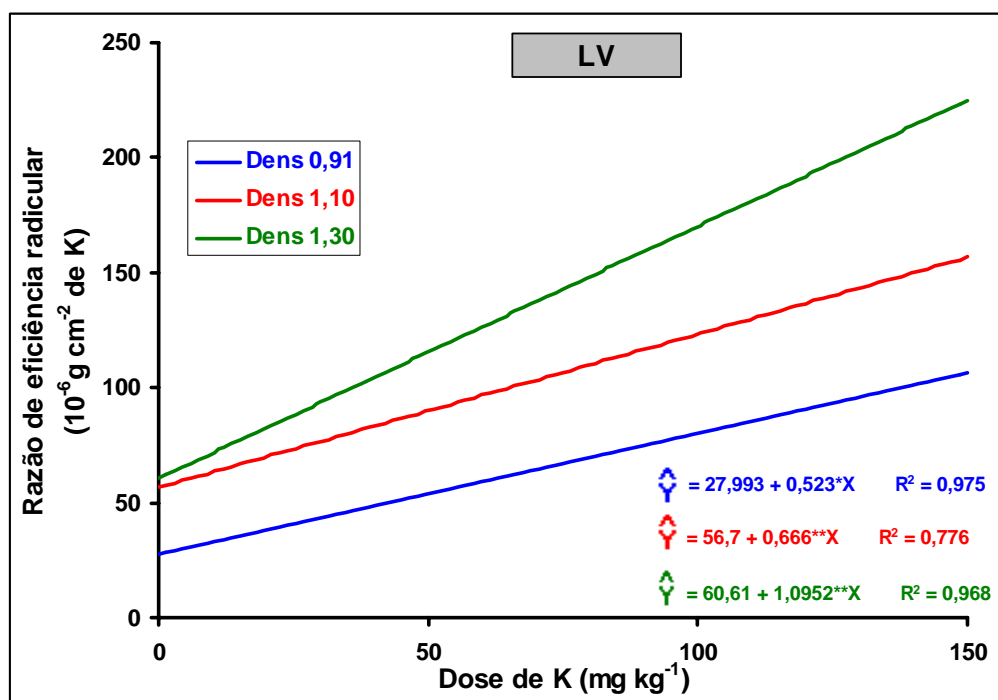


Figura 13 – Razão de eficiência radicular (RER) de K de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de K aplicado.

A alteração da disponibilidade de K nos solos, em função da compactação e da fertilização potássica pode ser verificada pela recuperação de K pelas plantas (Quadro 11).

A percentagem de recuperação de K pelas plantas variou de 29,4 a 74,7%, sendo a maior compactação do solo a principal responsável pelos menores valores encontrados, especialmente em menores doses de fertilização potássica, o que pode ser atribuído à redução da difusão, do crescimento radicular e, conseqüentemente, da absorção de K. Entretanto, verifica-se efeito benéfico dos níveis intermediários de compactação sobre a recuperação de K, reforçando a influência positiva de uma leve compactação do solo na absorção do nutriente.

Quadro 11 – Recuperação de potássio por plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, nas doses de K aplicado

Densidade do solo	Dose de K (mg kg <sup>-1</sup> )		
	50	100	150
g cm <sup>-3</sup>	-----%-----		
<b>LV</b>			
0,91	52,1	71,4	58,5
1,10	73,5	74,7	64,4
1,30	39,3	57,3	62,6
<b>LVA</b>			
1,35	49,5	72,6	55,2
1,55	74,0	68,6	48,4
1,75	29,4	49,9	30,9

#### 4.2.5. Crescimento e características radiculares

Houve, em resposta à compactação, decréscimo da densidade de raízes nos dois solos (Figura 14).



Como discutido anteriormente, a inibição na extensão de raízes em solos compactados está relacionada com o aumento da resistência mecânica, a deficiência de oxigênio, a acumulação de etileno e fitotoxinas e a limitada quantidade de nutrientes que chega às raízes pela redução da difusão de K.

A compactação acarretou o aumento do diâmetro médio de raízes nos dois solos (cujas causas já foram discutidas anteriormente no ensaio de P) e o decréscimo da superfície radicular no LV (Figuras 15 e 16).

As doses de potássio proporcionaram aumento da densidade de raízes e da superfície radicular no LVA, o que não aconteceu no LV. A se julgar pelo pequeno efeito das doses de potássio sobre o crescimento radicular, conclui-se pela adequada disponibilidade inicial do nutriente no solo para o crescimento das plantas. No entanto, a deficiência de K no LVA observada ao final do ensaio, proporcionou uma resposta mais tardia à fertilização potássica, uma vez que a exaustão do nutriente no solo ocorreu primeiramente nos tratamentos que receberam menores doses de K.

Verifica-se tendência de decréscimo do diâmetro de raízes com o aumento das doses de K no LVA e na densidade  $1,30 \text{ kg dm}^{-3}$  no LV (Figura 15). BECKER e MEURER (1986) também verificaram menores valores de raio médio de raízes de milho, em solo com elevado teor de K.

De acordo com HALLMARK e BARBER (1984), pouca informação está disponível sobre os efeitos dos teores de K no solo sobre o crescimento e morfologia das raízes. Assim, a variação do crescimento e das características radiculares observadas entre os solos, carece de maiores estudos para se alcançar um melhor entendimento dos processos envolvidos nesta dinâmica.

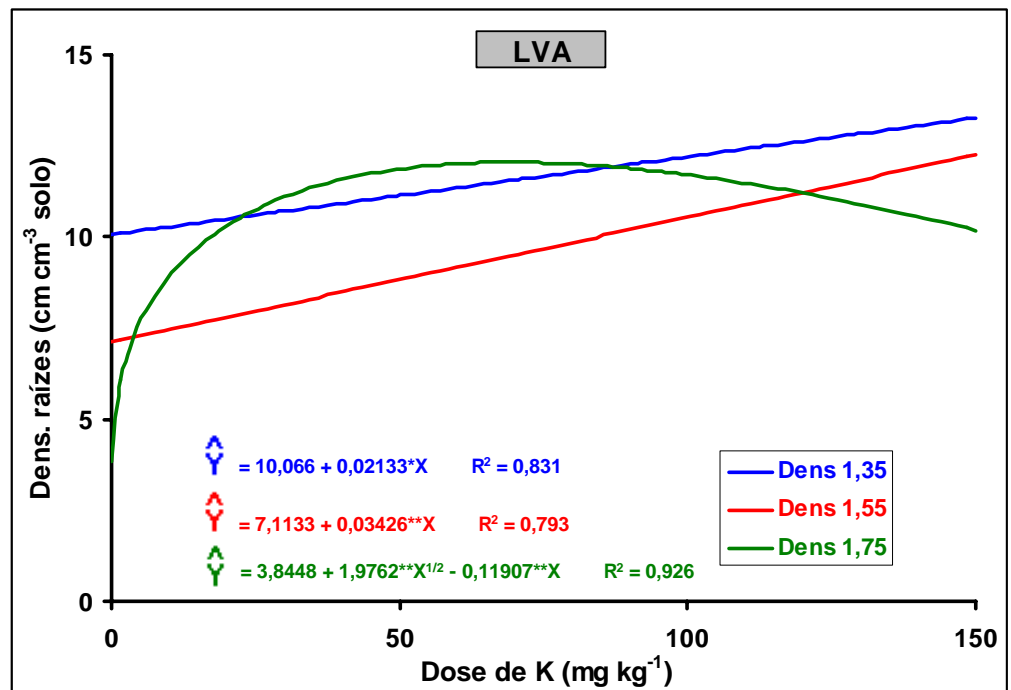
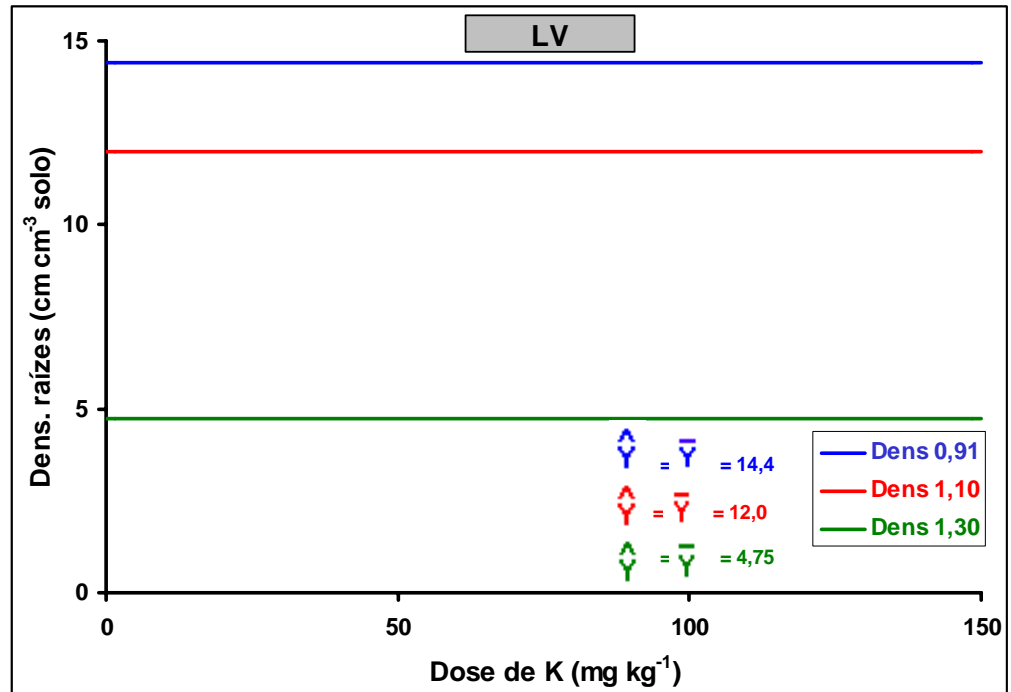


Figura 14 – Densidade de raízes de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de K aplicado.

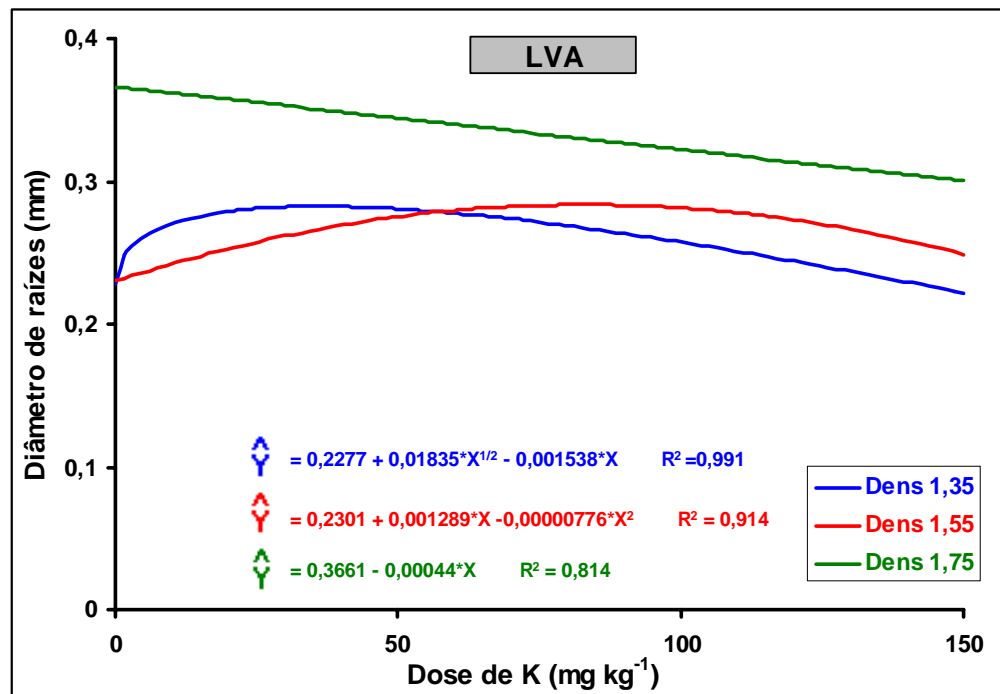
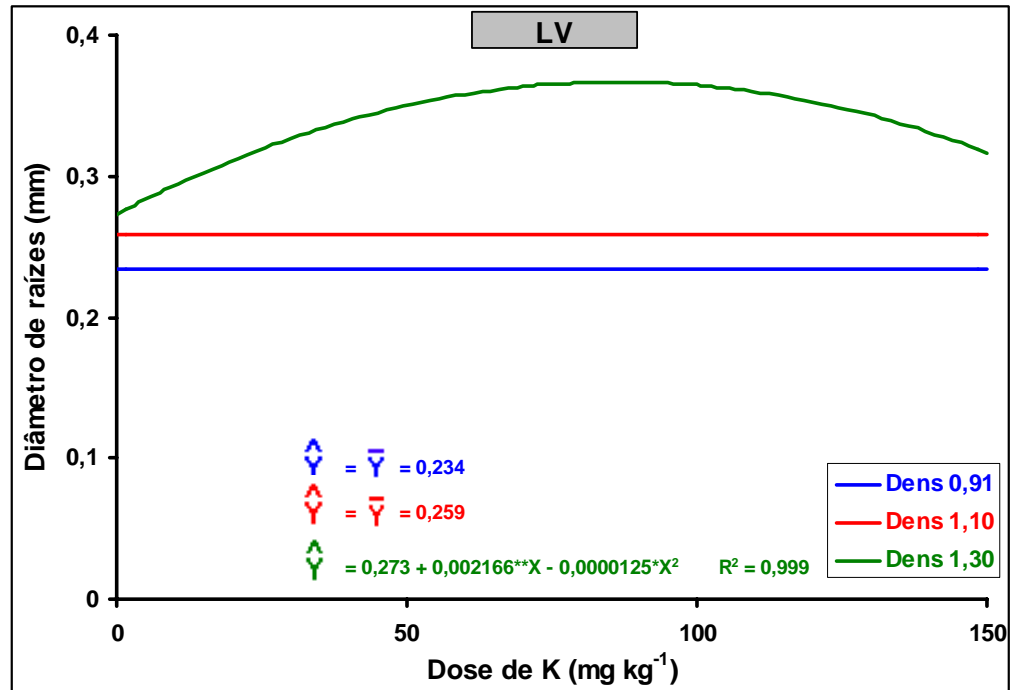


Figura 15 – Diâmetro de raízes de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de K aplicado.

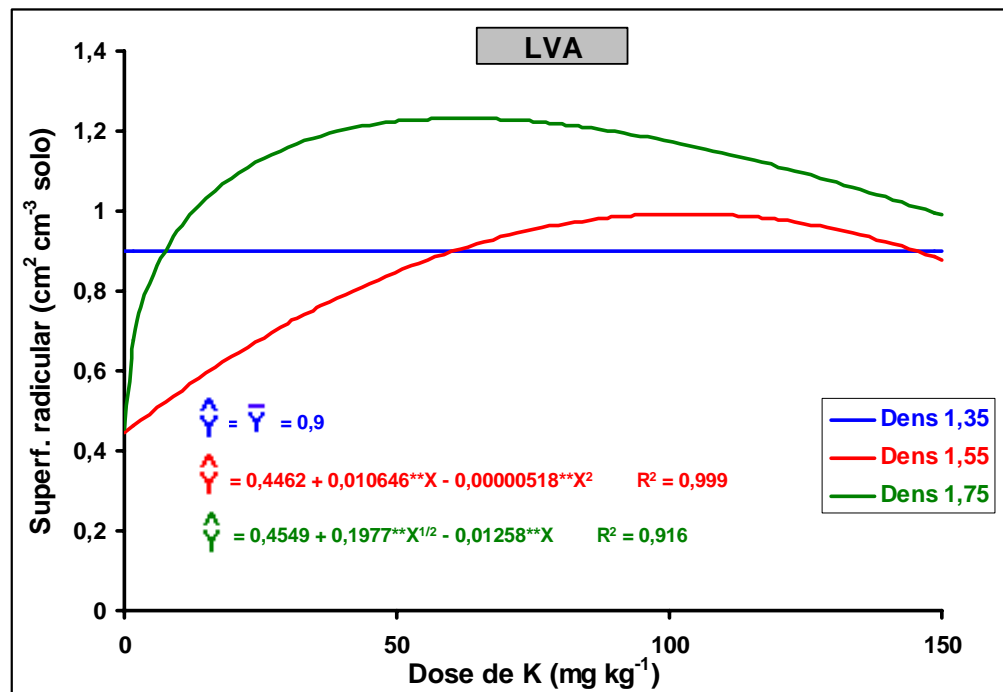
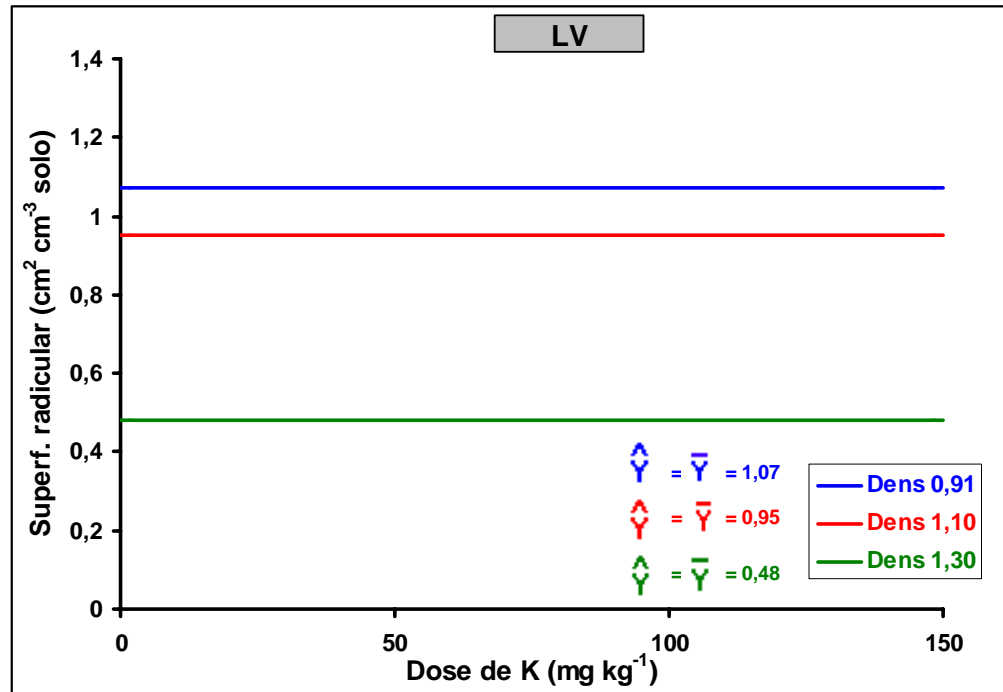


Figura 16 – Superfície radicular de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de K aplicado.

## 5. RESUMO E CONCLUSÕES

A compactação pode reduzir o crescimento de plantas por seu efeito no crescimento de raízes e conseqüente redução na absorção de água e de nutrientes. Apesar de representar um problema potencial para a nutrição mineral de florestas, poucos estudos foram conduzidos para avaliar o efeito da compactação sobre a nutrição de eucalipto. Por isso, este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar o crescimento de eucalipto influenciado pela compactação de solos e doses de fósforo e de potássio.

Utilizaram-se dois solos com texturas diferentes, em casa de vegetação, sendo os tratamentos dispostos num fatorial 4X3 (doses de nutriente X densidades do solo), em delineamento inteiramente casualizado. Quatro repetições foram utilizadas no ensaio de P e três repetições para o ensaio de K. Os solos foram acondicionados em vasos de PVC com 2 dm<sup>3</sup> de solo e compactados com o auxílio de uma prensa hidráulica, sendo testadas para o solo argiloso (LV) as densidades 0,91; 1,10 e 1,30 g cm<sup>-3</sup> e para o solo franco-arenoso (LVA) 1,35; 1,55 e 1,75 g cm<sup>-3</sup>. Os níveis de fósforo foram 0, 150, 300 e 600 mg kg<sup>-1</sup>, para o LV, e 0, 100, 200 e 400 mg kg<sup>-1</sup>, para o LVA. Os níveis de potássio foram 0, 50, 100 e 150 mg kg<sup>-1</sup> para os dois solos. A espécie testada foi o *Eucalyptus camaldulensis*.

O experimento foi colhido 100 dias após a emergência, sendo realizada a quantificação da matéria seca, mensuração de raízes (comprimento, diâmetro médio e superfície radicular) e análises químicas para determinar os teores de

fósforo e potássio no tecido vegetal e no solo.

Constatou-se que a compactação do solo restringiu o crescimento de raízes e aumentou o diâmetro médio destas na maioria das vezes; proporcionou redução no acúmulo de P e K na planta e reduziu a eficiência de utilização destes nutrientes; diminuindo, ainda, a percentagem de recuperação de P do solo.

Houve, em resposta às doses de fósforo, aumento do comprimento de raízes, da superfície radicular, da matéria seca, do conteúdo de P no tecido vegetal e da razão de eficiência radicular de P. Houve decréscimo da percentagem de recuperação de P com o aumento da fertilização fosfatada.

As doses de potássio elevaram a concentração e o conteúdo de K no tecido vegetal; proporcionaram aumento da matéria seca apenas nos tratamentos com maiores níveis de compactação; elevaram a razão de eficiência radicular de K; e proporcionaram decréscimo do diâmetro radicular na maioria das vezes.

O conteúdo e a concentração de P nas plantas foram influenciados por características dos solos que refletem o fator capacidade de P. Assim, no LV foram encontrados os menores valores de conteúdo e concentração de P nas plantas, uma vez que este solo apresenta maior fator capacidade de P, em relação ao LVA. A influência dessas características do solo na absorção de fósforo, em relação às doses aplicadas, explicou os diferentes coeficientes de utilização de P entre os solos, já que a produção de matéria seca não diferiu muito entre eles.

Conclui-se que a aplicação de fósforo em solos compactados e de potássio naqueles exageradamente compactados é fundamental para o crescimento de plantas de eucalipto; e que a compactação reduz o crescimento radicular e a eficiência da adubação fosfatada e potássica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, J. G. **Influência da profundidade de semeadura e da pressão de compactação no solo sobre a emergência de *Brachiaria brizanta* Stapf cv. Marandu.** Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1993. 65p. (Tese de Mestrado)
- ADAMS, M.B.; CAMPBELL, R.G.; ALLEN, H.L. Root and foliar nutrient concentrations in Loblolly Pine: effects of season, site and fertilization. **Forest Sci.**, **33**:984-996, 1987.
- ALVARENGA, R.C.; COSTA, L.M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A.J. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. **R. Bras. Ci. Solo**, **20**:319-326, 1996.
- ALVAREZ V., V.H; FONSECA, D.M. Definição de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios em casa de vegetação. **R. Bras. Ci. Solo**, **14**:49-55, 1990.
- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E.; OLIVEIRA, J.A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo, SBCS.** Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. v.25, 2000. p.27-32.
- AMATO, M.; PARDO, A. Root length and biomass losses during sample preparation with different screen mesh size. **Plant Soil**, **161**:299-303, 1994.
- ARAÚJO, A.P. Eficiência vegetal de absorção e utilização de fósforo, com especial referência ao feijoeiro. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V. H. e SCHAEFER, C.E.G.R., eds. **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.163-212.
- ATWELL, B.J. Physiological responses of lupin roots to soil compaction. **Plant Soil**, **111**:277-281, 1988.

- BALIGAR, V.C. NASH, V.E. HARE, M.L.; PRICE Jr. J.A. Soybean root anatomy as influenced by soil bulk density. **Agron. J.**, **67**:842-844, 1975.
- BARBER, S.A. Influence of the plant root on ion movement in soil. In: CARSON, E.W., ed. **The plant root and its environment**. Charlottesville, University Press of Virginia, 1974. p.525-564.
- BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability. A mechanistic approach**. New York, John Wiley & Sons, 1984. 398p.
- BARROS, N.F.; BRAGA, J.M.; BRANDI, R.M.; DEFELIPO, B.V. Produção de eucalipto em solos de cerrado em resposta à aplicação de NPK e de B e Zn. **R. Árvore**, **5**:90-103, 1981a.
- BARROS, N.F.; GOMES, J.M.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L. Níveis críticos de Ca e K no solo para o crescimento de mudas de *Eucalyptus grandis*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 18, Salvador, 1981. **Anais...** Salvador, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1981b. p. 92.
- BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. Eucalypt nutrition and fertilizer regimes in Brazil. In: ATTIWILL, P.M.; ADAMS, M.A., eds. **Nutrition of eucalypts**. Collingwood, CSIRO Publishing, 1996. p.335-355.
- BATTEN, G.D. A review of phosphorus efficiency in wheat. **Plant Soil**, **146**:163-168, 1992.
- BECKER, M.; MEURER, E.J. Morfologia de raízes, suprimento e influxo de potássio em plantas de milho. **R. Bras. Ci. Solo**, **10**:259-263, 1986.
- BIELESKI, R.L.; FERGUSON, I.B. Physiology and metabolism of phosphate and its compounds. In: LAUCHLI, A. e BIELESKI, R.L., eds. **Inorganic plant nutrition**. Encyclopedia of Plant Physiology. Berlin, Springer-Verlag, 1983. v.15a, p.422-449.
- BIELESKI, R.L. Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability. **Ann. Rev. Plant Physiol.**, **24**:225-252, 1973.
- BOHM, W. **Methods of studying root systems**. Spring-Verlag, New York, 1979. 188p.
- BORGES, E.N. **Resposta da soja e do eucalipto a camadas compactadas de solo**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1986. 74p. (Tese de Mestrado)
- BORGES, E.N.; LOMBARDI NETO, F.; CORRÊA, G.F.; BORGES, E.V.S.; COSTA, L.M. Acúmulo e N e P na parte aérea da soja após compactação subsuperficial e aplicação de gesso. **R. Bras. Ci. Solo**, **22**:127-133, 1998.
- BORGES, E.N.; LOMBARDI NETO, F.; CORRÊA, G.F.; COSTA, L.M. Misturas de gesso e matéria orgânica alterando atributos físicos de um latossolo com compactação simulada. **R. Bras. Ci. Solo**, **21**:125-130, 1997.



- BORGES, E.N.; NOVAIS, R.F.; REGASSI, A. J. FERNANDES, B.; BARROS, N.F. Respostas de variedades de soja à compactação de camadas de solo. **R. Ceres**, **35**:553-568, 1988.
- BRAGA, J.M. **Avaliação da fertilidade do solo.** (Parte I). Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1980. 87p.
- BRAGA, J.M.; DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de P em extratos de solo e material vegetal. **R. Ceres**, **21**:73-85, 1974.
- CAMARGO, O.A. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas.** Campinas, Fundação Cargill, 1983. 44p.
- CARVALHO JÚNIOR, I.A.; FONTES, L.E.F.; COSTA, L.M. Modificações causadas pelo uso e a formação de camadas compactadas e, ou, adensadas em um latossolo vermelho-escuro textura média, na região do cerrado. **R. Bras. Ci. Solo**, **22**:505-514, 1998.
- CASTILLO, S.R.; DOWDY, R.H.; BRADFORD, J.M.; LARSON, W.E. Effects of applied mechanical stress on plant growth and nutrient uptake. **Agron. J.**, **74**:526-530, 1982.
- CHAUVEL, A.; GRIMALDI, M.; TESSIER, D. Changes in soil – space distribution following deforestation and revegetation: An example from the Central Amazon basin, Brasil. **For. Ecol. Manage.**, **38**: 259-271, 1991.
- CHRISTIE, E.K.; MOORBY, J. Physiological responses of semiarid grasses. I. Influence of phosphorus supply on growth and phosphorus absorption. **Aust. J. Agric. Res.**, **26**:423-436, 1975.
- CINTRA, F.L.D. Caracterização do impedimento mecânico em Latossolos do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1980. 89p. (Tese de Mestrado)
- CINTRA, F.L.D.; MIELNICZUKL, J. Potencial de algumas espécies vegetais para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. **R. Bras. Ci. Solo**, **7**:197-201, 1983.
- CLARK, R.B. Plant genotype differences in the uptake, translocation, accumulation and use of mineral elements required for plant growth. **Plant Soil**, **72**: 175-196, 1983.
- COSTA, J.P.V. **Fluxo difusivo de fósforo e de potássio em Latossolos.** Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1998. 67p. (Tese de Doutorado)
- COSTA, L.M. Manejo de solos em áreas reflorestadas. In: BARROS, N.F. e NOVAIS, R.F., eds. **Relação solo-eucalipto.** Viçosa, Folha de Viçosa, 1990. p. 237-264.

- COSTA, L.M.; ABRAHÃO, W.A.P. Compactação e adensamento de solos relacionados às propriedades químicas, físicas e sedimentológicas. In: ALVAREZ V, V.H.; FONTES, L.E.F; FONTES, M.P.F., eds. **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Universidade Federal de Viçosa, 1996. p.429-443.
- CURI, N.; LARACH, J.O.I.; KÄMPF, N.; MONIZ, A.C.; FONTES, L.E.F. **Vocabulário de ciência do solo**. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. 90p.
- DALLA ROSA, A. Práticas mecânicas e culturais na recuperação de características físicas de solos degradados em Santo Ângelo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1981. 138p. (Tese de Mestrado)
- DEFELIPO, B.; RIBEIRO, A.C. **Análise química do solo (metodologia)**. Viçosa, UFV, Impr. Univ., 1981. 17 p. (Boletim de extensão n. 29).
- DE MARIA, I.C.; CASTRO, O.M.; SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em latossolo roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, **23**:703-709, 1999.
- DEXTER, A.R. Compression of soil around roots. **Plant Soil**, **97**:401-406, 1987.
- DIAS JÚNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. e SCHAEFER, C.E.G.R., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.55-94.
- DIAS JÚNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **R. Bras. Ci. Solo**, **20**:175-182, 1996.
- DIAS ZAMBRANA, M. O. **Efeito da compactação sobre propriedades físicas em três materiais de solo e sobre o crescimento das raízes de soja e caupi**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1994. 58p. (Tese de Mestrado)
- DOLAN, M.S.; DOWDY, R.H.; VOORHEES, W.B. ; JOHNSON, J.F.; BIDWELL-SCHRADER, A.M. Corn phosphorus and potassium uptake in response to soil compaction. **Agron. J.**, **84**:639-642, 1992.
- ELLIES, A.; RAMIREZ, C.; Mac DONALD, R. Cambios en la porosidad de un suelo por efecto de su uso. **Turrialba**, **43**:72-76, 1993.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1997, 212p.
- EPSTEIN, E. **Nutrição mineral das plantas: princípios e perspectivas**. São Paulo, Livros Técnicos e Científicos, 1975. 341p.

- EUCLYDES, R.F. Sistema para análises estatísticas e genéticas (SAEG) – manual provisório. Viçosa, CPD/UFV, divisão de pesquisa e desenvolvimento, 1983, 74p.
- FABRES, A.S.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F. e CORDEIRO, A.T. Níveis críticos de diferentes frações de fósforo em plantas de alface cultivadas em diferentes solos. **R. Bras. Ci. Solo**, **11**:51-57, 1987.
- FERNANDES, H.C.; VITÓRIA, E.L. Avaliação dos níveis de compactação de um solo florestal em relação à trafegabilidade das máquinas. **R. Árvore**, **22**:521-526, 1998.
- FERNANDES, R.B.A. **Influência das características químicas, físicas e mineralógicas na compactação de três latossolos**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1996. 117p. (Tese de Mestrado)
- FURTINI NETO, A.E. **Eficiência nutricional, cinética de absorção e frações fosfatadas em *Eucalyptus* spp.** Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1994. 99p. (Tese de Doutorado)
- GABRIEL FILHO, A. **Influência da variação de algumas propriedades físicas do solo no desenvolvimento de plantas de eucalipto (*Eucalyptus grandis*)**. Botucatu, Universidade Estadual Paulista, 1993. 100p. (Tese de Mestrado)
- GALO, M.V. **Resposta do eucalipto à aplicação de potássio em solo de cerrado**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1993. 40p. (Tese de Mestrado)
- GOMES, T.C.A. **Análise de trilha no estudo de fatores físicos e químicos relacionados ao adensamento e, ou, à compactação em dois solos do norte de Minas Gerais**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1996. 105p. (Tese de Mestrado)
- GONÇALVES, J.L.M.; FIRME, D.J.; NOVAIS, R.F.; RIBEIRO, A.C. Cinética de adsorção de fósforo em solos de cerrado. **R. Bras. Ci. Solo**, **9**:107-111, 1985.
- GOODARD, R.E.; HOLLIS, C.A. The genetic basis of forest tree nutrition. In: BOWEN, G.D.; NAMBIAR, E.K.S. **Nutrition of plantation forest**. London, Academic Press, 1984. p.237-258.
- GOSS, M.J.; EHLERS, W.; BOONE, F.R.; HOWSE, K.R. Effects of soil management practice on soil physical conditions affective root growth. **J. Agric. Res.**, **30**:131-140, 1984.
- GRAHAM, R.D. Breeding for nutritional characteristics in cereals. In: TINKER, P.B.; LANCHLI, A, eds. **Advances in plant nutrition**. New York, Praeger, 1984. p.57-102.

- GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction. **Adv. Soil Sci.**, **6**:65-100, 1987.
- HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil Till. Res.**, **11**:239-282, 1988.
- HALLMARK, W.B.; BARBER, S.A. Root growth and morphology, nutrient uptake, and nutrient status of early growth of soybeans as affected by soil P and K. **Agron. J.**, **76**:209-212, 1984.
- HERBAUTS, J.; EL BAYAD, J.; GRUBER, W. Influence of traffic on the hydromorphic degradation of acid forest soil developed on loessic loam in middle Belgium. **For. Ecol. Manage.**, **87**:193-207, 1996.
- HIRA, G.S.; SINGH, N.T. Observed and predicted rates of phosphorus diffusion in soils of varying bulk density and water content. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, **41**:537-540, 1977.
- JOHNSON, C.M.; ULRICH, A. **Analytical methods for use in plants analyses**. Los Angeles, University of California, 1959. v.766, p.32-33.
- JORDAN, C.F.; ESCALANTE, G. Root productivity in Amazonian rain forest. **J. Ecol.**, **61**:14-18, 1980.
- JUCKSCH, I. **Calagem e dispersão de argila em amostra de um Latossolo Vermelho-Escuro**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1987. 37p. (Tese de Mestrado)
- KONDO, M.K. Compressibilidade de três Latossolos sob diferentes usos. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 1998. 121p. (Tese de Mestrado)
- KREJCI, L.C.; MARTINS, L.G.C.; LOURENÇO, P.Y. **Desenvolvimento do sistema radicular de *Eucalyptus* sp sob diferentes condições de solo**. Salvador, COPENER, 1986. 24p.
- LOGANATHAN, P.; FERNANDO, W.T. Phosphorus sorption by some coconut-growing acid soils of Sri Lanka and its relationship to selected soil properties. **J. Sci. Food Agric.**, **31**:709-717, 1980.
- LONERAGAN, J.F.; ASHER, C.J. Response of plants to phosphate concentration in solution culture. II Rate of phosphate absorption and its relation to growth. **Soil Sci.** **103**:311-318, 1967.
- LOWERY, B.; SCHULER, R.T. Temporal effects of subsoil compaction on soil strength and plant growth. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, **55**:216-223, 1991.
- MALTONI, K. L. **Estudo de compactação e/ou adensamento em subsuperfície de Latossolos sob diferentes usos**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1994. 139p. (Tese de Doutorado)
- MANTOVANI, E.C. Compactação do solo. **Informe Agrop.**, **13**:52-55, 1987.

- MAPFUMO, E.; CHANASYK, D.S.; NAETH, M.A.; BARON, V.S. Forage growth and yield components as influenced by subsurface compaction. **Agron. J.**, **90**:805-812, 1998.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2.ed. San Diego, Academic Press, 1995. 889p.
- MARTINS, S.S. **Efeitos da exploração madeireira no solo, na florística e na estrutura de uma Floresta Estacional Semidecidual no sudeste do Paraná**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1995. 119p. (Tese de Doutorado)
- MASLE, J.; PASSIOURA, J.B. Effects of soil strength on the growth of wheat seedlings. **Aust. J. Plant Physiol.**, **14**:643-656, 1987.
- MATERECHERA, S.A.; ALSTON, A.M. KIRBY, J.M.; DEXTER, A.R. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted soil. **Plant Soil**, **144**: 297-303, 1992.
- MENGEL, K. Fatores e processos que afetam as necessidades de potássio das plantas. In: SIMPÓSIO SOBRE POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, Londrina, 1982. **Anais ...**, Piracicaba, Instituto da Potassa e Fosfato, 1982. p.323-338.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. Principles of plant nutrition. 4.ed. Bern, International Potash Institute, 1987. 687p.
- MISRA, R.K.; GIBBONS, A.K. Growth and morphology of eucalypt seedling-roots, in relation to soil strenght arising from compaction. **Plant Soil**, **182**:1-11, 1996.
- MORAES, M.H. **Efeitos da compactação em algumas propriedades físicas do solo e no desenvolvimento do sistema radicular de plantas de soja (*Glycine max* (L.) Merrill)**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP, 1988. 106p. (Tese de Mestrado)
- MUNIZ, A.S.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F. e NEVES, J.C.L. Nível crítico de fósforo na parte aérea da soja como variável do fator capacidade de fósforo do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, **9**:237-243, 1985.
- MUNIZ, A.S.; NOVAIS, R.F.; FREIRE, F.M.; NEVES, J.C.L. e BARROS, N.F. Disponibilidade de fósforo e recomendação de adubação avaliadas por meio de extratores químicos e do crescimento de soja em amostras de solo com diferentes valores do fator capacidade. **R. Ceres**, **34**:125-151, 1987.
- NADIAN, H.; SMITH, S.E.; ALSTON, A.M.; MURRAY, R.S. The effect of soil compaction on growth and P uptake by *Trifolium subterraneum*: interactions with mycorrhizal colonisation. **Plant Soil**, **182**: 39-49, 1996.
- NOVAIS, R.F. **Phosphorus supplying capacity of previously heavily fertilized soils**. Raleigh, North Carolina State University, 1977. 153p. (Tese de Doutorado)

- NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. Interpretação da análise química do solo para o crescimento e desenvolvimento de *Eucalyptus spp.* Níveis críticos de implantação e manutenção. **R. Árvore**, **10**:105-111, 1986.
- NOVAIS, R.F.; KAMPRATH, E.J. Parâmetros das isotermas de adsorção de fósforo como critério de recomendação de adubação fosfatada. **R. Bras. Ci. Solo**, **3**:37-41, 1979.
- NOVAIS, R.F.; REGO, A.K.; GOMES, J.M. Nível crítico de potássio no solo e na planta para o crescimento de mudas de *E. grandis* W. Hill ex-Maiden e de *E. cloeziana* F. Muell. **R. Árvore**, **4**:14-23, 1980.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.
- NOVAK, L.R. MANTOVANI, E.C.; MARTYN, P.J.; FERNADES, B. Efeito do tráfego de trator e da pressão de contato pneu/solo na compactação de um latossolo Vermelho-Escuro álico, em dois níveis de umidade. **Pesq. Agropec. Bras.**, **27**:1587-1595, 1992.
- OLIVEIRA, C.V. ; BAHIA, V.G.; PAULA, M.B. Compactação do solo devido à mecanização florestal: causas, efeitos e práticas de controle. **Informe Agropec.**, **191**:46-48, 1998.
- OLIVEIRA, T.S. **Efeitos dos ciclos de umedecimento e secagem sobre propriedades físicas e químicas de quatro Latossolos brasileiros**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1992. 104p. (Tese de Mestrado)
- PAULA, R.C. **Variabilidade genética para crescimento e eficiência nutricional em progênies de meio-irmãos de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.** Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1995. 102p. (Tese de Mestrado)
- PETERSON, W.R.; BARBER, S.A. Soybean root morphology and K uptake. **Agron. J.**, **73**:316-319, 1981.
- PHILLIPS, R.E.; BROWN, D.A. Ion diffusion. III. The effect of soil compaction on self-diffusion of <sup>86</sup>Rb and <sup>89</sup>Sr. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.**, **29**:657-661, 1965.
- PRIMAVESSI, O. M.A.S.P.R.B. **Nutrição mineral de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em dois solos sujeitos à compactação**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP, 1983. 142p. (Tese de Mestrado)
- RAB, M.A. Soil physical and hydrological properties following logging and slash burning in the *Eucalyptus regnans* forest of southeastern Australia. **For. Ecol. Manage.**, **84**:159-176, 1996.

- RIBEIRO, M.A.V.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. Response of eucalypt to phosphorus rate applied to soils with different densities. In: **INFRO. MANEJAMENTO DE ÁGUA E NUTRIENTES PARA AUMENTAR O CRESCIMENTO DA FLORESTA – SEMINÁRIO**. Poster 22, Camberra, 1987. Program and abstracts. Canberra, IUFRO Division, 1987.
- 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. Programa e resumos. Campinas, SBCS, 1985. p.125.
- RITCHEY, K.D. **O potássio nos Oxisolos e Ultissolos dos trópicos úmidos**. Piracicaba, Instituto da Potassa e Fosfato/Instituto Internacional de Potassa, 1982. 60p. (Boletim Técnico, 7)
- RÖMER, W.; AUGUSTIN, J.; SCHILLING, G. The relationship between phosphate absorption and root length in nine wheat cultivars. In: LOUGHMAN, B.C. et al., eds. **Structural and functional aspects of transport in roots**. Nijhoff, Kluwer Academic Publishers, 1989. p.123-125.
- ROSOLEM, C.A.; ALMEIDA, A.C.S.; SACRAMENTO, L.V.S.S. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. **Bragantia**, **53**:259-266, 1994.
- SANTOS, O.M. **Efeito de fungo micorrízico vesículo-arbuscular sobre o crescimento e a absorção de fósforo, de nitrato e de amônio por mudas de *Eucalyptus grandis* Hill, ex Maiden e de *E. camaldulensis* Dehnh., sob estresse hídrico e solo compactado**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1995. 77p. (Tese de Doutorado)
- SCHENK, M.K.; BARBER, S.A. Phosphate uptake by corn as affected by soil characteristics and root morphology. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, **43**:880-883, 1979a.
- SCHENK, M.K.; BARBER, S.A. Root characteristics of corn genotypes as related to P uptake. **Agron. J.**, 71:921-924, 1979b.
- SCOPLE, I.; ROCHA, H.O.; MALINOVSKI, J.R. Riscos de compactação do solo na produção florestal. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO SOBRE SISTEMAS DE EXPLORAÇÃO E TRANSPORTE FLORESTAL, 7, Curitiba, 1992. **Anais...** Curitiba: UFPR-FUPEF, 1992. p.172-193.
- SHIERLAW, J.; ALSTON, A.M. Effects of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. **Plant Soil**, **77**:15-28, 1984.
- SIDDIQI, M.Y.; GLASS, A.D.M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **J. Plant Nutr.**, **4**:289-302, 1981.

- SIDIRAS, N.; VIEIRA, M.J. Compactação de um Latossolo Roxo-Distrófico compactado pelas rodas de um trator na semeadura. **Pesq. Agropec. Bras.**, **19**:1285-93, 1984.
- SILBERBUSH, M.; BARBER, S.A. Sensitivity of simulated phosphorus uptake to parameters used by a mechanistic-mathematical model. **Plant Soil**, **74**:93-100, 1983.
- SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L.; CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. **R. Bras. Ci. Solo**, **10**:91-95, 1986.
- SILVA, G.P.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F. Respostas de espécies de gramíneas forrageiras a camadas compactadas de solo. **R. Ceres**, **39**:31-43, 1992.
- SILVA, I.R.; FURTINI NETO, A.E.; VALE, F.R.; CURI, N. Eficiência nutricional para potássio em espécies florestais nativas. **R. Bras. Ci. Solo**, **20**:257-264, 1996.
- SILVA, R.B.; LIMA, J.M.; DIAS JÚNIOR, M.S. Efeito da adsorção de fosfato em parâmetros físicos e na compressibilidade de solos tropicais. **R. Bras. Ci. Solo**, **23**:219-226, 1999.
- SINGH, R.; MÖLLER, M.R.F.; FERREIRA, W.A. Cinética da sorção de fósforo em solos dos trópicos úmidos da Amazônia. **R. Bras. Ci. Solo**, **7**:227-231, 1983.
- SOANE, B.D.; BLACKWELL, P.S.; DICKSON, J.W.; PAINTER, D.J. Compaction by agricultural vehicles: A review II. Compaction under tyres and other running gear. **Soil Till. Res.**, **1**:373-400, 1981.
- SOUZA, C. M. **Efeito do uso contínuo de grade pesada sobre algumas características físicas e químicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, Fase Cerrado, e sobre o desenvolvimento das plantas e absorção de nutrientes pela cultura da soja.** Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1988. 105p. (Tese de Mestrado)
- TAYLOR, H.M. Root behavior as affected by soil structure and strength. In: CARSON, E.W., ed. **The plant root and its environment.** Charlottesville, University of Virginia, 1971. p. 28-291.
- TAYLOR, H.M.; BRAR, G.S. Effects of soil compaction on root development. **Soil Till. Res.**, **19**:111-119, 1991.
- TAYLOR, J.H. Benefits of permanent traffic lanes in a controlled traffic crop production system. **Soil Till. Res.**, **3**:385-395, 1983.
- TENNANT, D.A. A test of a modified line intersect method of estimating root length. **J. Ecol.**, **63**:995-1001, 1975.
- UNGER, P.W.; KASPAR, T.C. Soil compaction and root growth: a review. **Agron. J.**, **86**:759-766, 1994.



- VANCE, E.D., NADKARNI, N.M. Root biomass distribution in a moist tropical montane forest. **Plant Soil**, **142**:31-39, 1992.
- VETTORI, L. **Métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, Equipe de pedologia e fertilidade do solo. 1969. 24p. (Boletim Técnico, 7)
- WARNCKE, D.D.; BARBER, S.A. Diffusion of Zn in soils: II. The influence of soil bulk density and its interaction with soil moisture. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, **36**:42-46, 1971.
- WHITE, E.M. Soil compaction and contraction around plant roots. **Soil Sci.**, **119**:461-465, 1975.
- WHITMAM, A.A.; BROKAW, N.V.L.; HAGAN, J.M. Forest damage caused by selection logging of mahogany (*Swietenia macrophylla*) in northern Belize. **For. Ecol. Manage.**, **92**:87-96, 1997.
- WOODWARD, C.L. Soil compaction and topsoil removal effects on soil properties and seedling growth in Amazonian Ecuador. **For. Ecol. Manage.**, **82**:197-209, 1996.
- YOUNG, I.M. Biophysical interactions at the root-soil interface: a review. **J. Agric. Sci.**, **130**:1-7, 1998.

## APÊNDICES

## APÊNDICE A

Quadro 1A – Resumo das análises de variância para o peso seco de raiz, folha, caule, parte aérea, total e relação raiz/parte aérea (R/PA) de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de P aplicado

F.V.	GL	Quadrado Médio					
		Peso seco (g vaso <sup>-1</sup> )					Relação R/PA
		Raiz	Folha	Caule	P. aérea	Total	
<b>LV</b>							
Compac (C)	2	7,5175 **	55,07 **	15,3433 **	116,891 **	183,61 **	0,01019 ns
Dose P (P)	3	26,7543 **	350,40 **	69,4575 **	827,682 **	1150,73 **	0,32489 **
C*P	6	1,3533 **	7,82 **	0,6031 ns	15,480 **	25,21 **	0,02595 ns
C/P=0	2	0,0002 ns	0,005 ns	-	0,005 ns	0,01 ns	0,08154 **
C/P=150	2	3,2618 **	42,06 **	3,8748 *	71,241 **	104,70 **	0,97245 **
C/P=300	2	3,2468 **	14,28 **	4,5100 **	37,7782 **	58,62 **	0,00238 ns
C/P=600	2	5,0687 **	22,20 **	8,1646 **	57,2911 **	95,90 **	0,00313 ns
Residuo	36	0,2247	0,83	0,8023	2,231	3,39	0,01561
CV(%)		25,1	13,1	20,6	14,7	15,2	46,7
<b>LVA</b>							
Compac (C)	2	3,2806 **	17,53 **	4,6067 **	40,06 **	65,18 **	0,00790 **
Dose P (P)	3	20,4209 **	209,42 **	81,8818 **	552,48 **	780,40 **	0,02780 **
C*P	6	0,5743 ns	4,03 *	1,4194 ns	9,87 *	13,42 *	0,00274 ns
C/P=0	2	0,3441 ns	2,32 ns	0,3451 ns	4,44 ns	6,88 ns	0,00757 **
C/P=100	2	0,4005 ns	5,49 *	1,8057 ns	13,59 *	18,62 *	0,00025 ns
C/P=200	2	1,7270 *	12,21 **	2,4064 *	25,02 **	34,41 **	0,00727 *
C/P=400	2	2,5312 **	9,60 **	4,3076 **	26,63 **	45,54 **	0,00194 ns
Resíduo	36	0,3740	1,30	0,6271	3,26	5,10	0,00143
CV(%)		26,6	14,7	20,0	15,4	16,1	18,0

\* e \*\* - Significativo ao nível de 5 e 1% de significância pelo teste F  
ns - Não significativo.

Quadro 2A – Resumo das análises de variância para a altura, concentração de P na raiz, folha, caule e solo em plantas de *E. camaldulensis* cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de P aplicado

F.V.	GL	Quadrado Médio				
		Altura (cm)	Concentração de fósforo (dag kg <sup>-1</sup> )			Solo (mg kg <sup>-1</sup> )
			Raiz	Folha	Caule	
<b>LV</b>						
Compac (C)	2	573,1 **	0,00250 <sup>ns</sup>	0,00041 <sup>ns</sup>	0,0192 **	757,219 **
Dose P (P)	3	12694,3 **	0,01156 **	0,04627 **	0,0190 **	29222,020 **
C*P	6	119,4 **	0,00174 <sup>ns</sup>	0,00529 **	0,0011 <sup>ns</sup>	214,815 **
C/P=0	2	11,3 <sup>ns</sup>	0,00689 **	0,01148 **	-	0,581 <sup>ns</sup>
C/P=150	2	727,8 **	0,00028 <sup>ns</sup>	0,00108 <sup>ns</sup>	0,0112 **	31,795 <sup>ns</sup>
C/P=300	2	53,2 *	0,00023 <sup>ns</sup>	0,00835 *	0,0041 <sup>ns</sup>	216,398 **
C/P=600	2	139,2 **	0,00032 <sup>ns</sup>	0,00230 *	0,0060 <sup>ns</sup>	1152,891 **
Residuo	36	13,9	0,00099	0,00069	0,0019	9,824
CV(%)		7,8	26,6	17,1	26,2	7,15
<b>LVA</b>						
Compac (C)	2	226,8 **	0,00117 <sup>ns</sup>	0,00502 <sup>ns</sup>	0,0056 <sup>ns</sup>	260,763 <sup>ns</sup>
Dose P (P)	3	3123,5 **	0,14366 **	0,18341 **	0,2640 **	85438,207 **
C*P	6	107,0 *	0,00219 *	0,00869 *	0,0042 <sup>ns</sup>	442,029 *
C/P=0	2	116,1 <sup>ns</sup>	0,00018 <sup>ns</sup>	0,00340 <sup>ns</sup>	0,0002 <sup>ns</sup>	0,629 <sup>ns</sup>
C/P=100	2	268,3 **	0,00149 <sup>ns</sup>	0,00219 <sup>ns</sup>	0,0011 <sup>ns</sup>	21,291 <sup>ns</sup>
C/P=200	2	81,9 <sup>ns</sup>	0,00045 <sup>ns</sup>	0,02285 **	0,0069 <sup>ns</sup>	812,275 **
C/P=400	2	81,4 <sup>ns</sup>	0,00565 <sup>ns</sup>	0,00237 <sup>ns</sup>	0,0100 *	752,653 **
Resíduo	36	37,2	0,00805	0,00344	0,0022	141,064
CV(%)		10,6	14,8	21,5	16,1	14,89

\* e \*\* - Significativo ao nível de 5 e 1% de significância pelo teste F  
ns - Não significativo.

Quadro 3A - Resumo das análises de variância para o conteúdo de P na raiz, folha, caule, parte aérea e total em plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de P aplicado

F.V.	GL	Quadrado Médio				
		Conteúdo de fósforo (mg vaso <sup>-1</sup> )				
		Raiz	Folha	Caule	P. aérea	Total
<b>LV</b>						
Compac (C)	2	15,68 **	94,9 **	112,24 **	317,7 **	474,6 **
Dose P (P)	3	64,32 **	1340,2 **	293,69 **	3039,2 **	3983,4 **
C*P	6	3,62 **	27,9 **	9,73 <sup>ns</sup>	66,2 **	94,0 **
C/P=0	2	0,0004 <sup>ns</sup>	0,0136 <sup>ns</sup>	-	0,013 <sup>ns</sup>	0,019 <sup>ns</sup>
C/P=150	2	4,20 **	110,2 **	17,69 <sup>ns</sup>	206,1 **	267,4 **
C/P=300	2	6,49 **	0,6 <sup>ns</sup>	32,46 *	39,2 <sup>ns</sup>	77,3 *
C/P=600	2	15,86 **	67,8 **	81,54 **	271,1 **	411,9 **
Residuo	36	0,58	5,0	6,76	14,4	17,7
CV(%)		29,8	17,5	34,7	20,6	20,0
<b>LVA</b>						
Compac (C)	2	9,49 <sup>ns</sup>	86,7 *	55,10 **	238,5 *	337,4 *
Dose P (P)	3	327,52 **	4678,9 **	1408,18 **	11164,6 **	15196,3 **
C*P	6	2,52 <sup>ns</sup>	118,7 **	15,79 <sup>ns</sup>	201,9 **	208,1 *
C/P=0	2	0,24 <sup>ns</sup>	9,2 <sup>ns</sup>	0,26 <sup>ns</sup>	12,6 <sup>ns</sup>	16,1 <sup>ns</sup>
C/P=100	2	0,19 <sup>ns</sup>	7,9 <sup>ns</sup>	17,32 <sup>ns</sup>	46,4 <sup>ns</sup>	52,6 <sup>ns</sup>
C/P=200	2	11,48 <sup>ns</sup>	49,4 <sup>ns</sup>	8,83 <sup>ns</sup>	31,3 <sup>ns</sup>	17,0 <sup>ns</sup>
C/P=400	2	5,12 <sup>ns</sup>	376,1 **	76,08 **	753,9 **	875,9 **
Residuo	36	4,42	26,5	10,42	47,7	70,3
CV(%)		38,5	20,9	23,3	17,9	19,1

\* e \*\* - Significativo ao nível de 5 e 1% de significância pelo teste F

<sup>ns</sup> - Não significativo.

Quadro 4A – Resumo das análises de variância para a densidade, diâmetro, superfície radicular e razão de eficiência radicular (RER) de P de raízes de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de P aplicado

F.V	G.L	Quadrado Médio			
		Características radiculares			
		Densidade	Diâmetro	Sup. radicular	RER de P
		cm cm <sup>-3</sup>	mm	cm <sup>2</sup> cm <sup>-3</sup>	µg cm <sup>-2</sup>
<b>LV</b>					
Compac (C)	2	210,8315 **	0,028477 **	0,756615 **	107,2530 *
Dose P (P)	3	266,7628 **	0,001866 ns	1,579936 **	1996,3690 **
C*P	6	21,0151 **	0,003002 ns	0,138432 **	91,9680 **
C/P=0	2	1,9225 ns	0,002367 ns	0,005998 ns	0,3857 ns
C/P=150	2	111,3433 **	0,006807 *	0,380141 **	25,3044 ns
C/P=300	2	89,0433 **	0,009837 *	0,233725 **	66,9279 ns
C/P=600	2	71,5674 **	0,018469 **	0,552047 **	290,5374 **
Resíduo	36	2,5632	0,002088	0,027363	22,1880
CV(%)		21,1	18,6	29,0	31,3
<b>LVA</b>					
Compac (C)	2	90,0765 **	0,062265 **	0,018863 ns	48,4410 ns
Dose P (P)	3	267,3964 **	0,005209 ns	1,470623 **	2290,9060 **
C*P	6	11,1120 *	0,007019 ns	0,205626 **	141,2640 **
C/P=0	2	32,1033 **	0,018963 **	0,180099 *	12,2631 ns
C/P=100	2	13,3358 *	0,051958 **	0,237243 **	78,2507 ns
C/P=200	2	7,0824 ns	0,009032 ns	0,043414 ns	56,6659 ns
C/P=400	2	70,8908 **	0,003370 ns	0,174984 *	325,0546 **
Resíduo	36	3,5963	0,003585	0,040165	37,8370
CV(%)		18,2	22,0	23,8	26,7

\* e \*\* - Significativo ao nível de 5 e 1% de significância pelo teste F  
ns - Não significativo.

Quadro 5A – Resumo das análises de variância para o peso seco de raiz, folha, caule, parte aérea, total e relação raiz/parte aérea (R/PA) de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de K aplicado

F.V.	GL	Quadrado Médio					Relação R/PA
		Peso seco (g vaso <sup>-1</sup> )					
		Raiz	Folha	Caule	P. aérea	Total	
<b>LV</b>							
Compac (C)	2	26,037 **	125,107 **	53,387 **	340,541 **	544,578 **	0,01854 **
Dose K (K)	3	2,216 ns	32,766 **	8,320 **	72,960 **	88,440 **	0,00653 ns
C*K	6	2,408 ns	6,270 **	2,741 *	15,433 **	26,748 **	0,00692 ns
C/K=0	2	10,850 **	48,333 **	15,187 **	17,542 **	187,258 **	0,02220 **
C/K=50	2	18,323 **	69,572 **	26,255 **	181,263 **	312,101 **	0,01260 *
C/K=100	2	1,056 ns	15,770 **	15,769 **	59,095 **	75,623 **	0,00200 s
C/K=150	2	3,030 *	10,933 **	4,399 **	28,940 **	49,842 **	0,00250 s
Resíduo	24	0,978	1,047	0,785	2,949	5,819	0,00322
CV(%)		31,9	10,6	18,4	11,8	13,7	27,2
<b>LVA</b>							
Compac (C)	2	4,957 **	51,627 **	23,997 **	145,989 **	193,111 **	0,01327 *
Dose K (K)	3	2,475 **	21,775 **	10,484 **	60,334 **	82,230 **	0,00655 ns
C*K	6	0,982 *	4,393 *	2,008 ns	10,274 *	15,449 **	0,00482 ns
C/K=0	2	3,635 **	36,665 **	16,806 **	102,764 **	144,794 **	0,00190 ns
C/K=50	2	2,378 **	16,101 **	8,060 **	46,884 **	61,916 **	0,01370 *
C/K=100	2	0,247 s	2,060 ns	4,022 *	9,975 ns	10,472 ns	0,00230 ns
C/K=150	2	1,644 **	9,982 **	1,135 ns	17,189 *	22,279 *	0,00980 *
Resíduo	24	0,269	1,618	0,884	3,609	4,210	0,00248
CV(%)		18,7	14,4	19,5	13,9	12,5	23,7

\* e \*\* - Significativo ao nível de 5 e 1% de significância pelo teste F

ns - Não significativo.

Quadro 6A – Resumo das análises de variância para a altura, concentração de K na raiz, folha, caule e solo em plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de K aplicado

F.V.	GL	Quadrado Médio				
		Altura (cm)	Concentração de potássio (dag kg <sup>-1</sup> )			Solo (mg kg <sup>-1</sup> )
			Raiz	Folha	Caule	
<b>LV</b>						
Compac (C)	2	1671,8 **	0,261 **	1,866 **	0,961 **	658,3913 **
Dose de K (K)	3	183,1 ns	0,150 **	1,922 **	0,824 **	593,4394 **
C*K	6	295,1 **	0,023 *	0,126 **	0,042 **	112,3764 **
C/K=0	2	979,1 **	0,126 **	0,148 **	0,298 **	14,7594 ns
C/K=50	2	648,7 **	0,143 **	0,801 **	0,429 **	49,5739 ns
C/K=100	2	834,4 **	0,043 *	0,228 **	0,182 **	256,9970 **
C/K=150	2	95,3 ns	0,020 ns	1,069 **	0,178 **	674,1902 **
Resíduo	24	69,6	0,009	0,022	0,009	25,0384
CV(%)		13,1	17,7	12,9	11,6	26,7
<b>LVA</b>						
Compac (C)	2	465,9 **	0,073 **	0,397 **	0,216 **	14,1693 *
Dose K (K)	3	507,7 **	0,646 **	3,128 **	1,721 **	141,5915 **
C*K	6	50,8 ns	0,018 ns	0,054 *	0,035 ns	7,4407 ns
C/K=0	2	383,7 **	0,007 ns	0,015 ns	0,006 ns	1,1561 ns
C/K=50	2	119,1 ns	0,041 *	0,112 ns	0,194 **	0,1839 ns
C/K=100	2	84,2 ns	0,020 ns	0,103 ns	0,029 ns	0,7227 ns
C/K=150	2	34,4 ns	0,059 **	0,331 ns	0,091 *	34,4287 **
Resíduo	24	47,6	0,010	0,016	0,017	3,8852
CV(%)		10,8	19,1	9,7	14,4	37,9

\* e \*\* - Significativo ao nível de 5 e 1% de significância pelo teste F

ns - Não significativo.



Quadro 7A – Resumo das análises de variância para o conteúdo de K na raiz, folha, caule, parte aérea e total em plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de K aplicado

F.V.	GL	Quadrado Médio				
		Conteúdo de potássio (mg vaso <sup>-1</sup> )				
		Raiz	Folha	Caule	P. aérea	Total
<b>LV</b>						
Compac (C)	2	184,75 **	6411,02 **	857,40 **	10724,92 **	12256,43 **
Dose K (K)	3	281,76 **	36630,90 **	4625,27 **	67203,38 **	74886,57 **
C*K	6	37,00 *	1237,59 **	32,56 ns	1399,57 **	1359,14 **
C/K=0	2	34,49 ns	801,81 *	121,76 ns	1533,69 **	1991,27 **
C/K=50	2	164,26 **	1974,53 **	312,96 **	3824,88 **	5289,71 **
C/K=100	2	23,76 ns	2254,68 **	314,00 **	3472,71 **	4070,63 **
C/K=150	2	73,25 **	5092,76 **	206,36 *	6092,34 **	4982,22 **
Resíduo	24	11,79	170,50	37,83	182,80	222,72
CV(%)		22,6	12,0	16,5	9,3	9,3
<b>LVA</b>						
Compac (C)	2	131,62 **	12089,77 **	2467,68 **	25420,44 **	28383,10 **
Dose K (K)	3	457,68 **	38171,34 **	6201,48 **	74223,29 **	86158,10 **
C*K	6	24,18 ns	636,87 ns	131,87 ns	1022,72 ns	1031,60 ns
C/K=0	2	45,73 *	2180,27 **	397,89 ns	4440,52 **	5387,50 **
C/K=50	2	13,15 ns	1940,95 **	930,40 **	5558,47 **	6024,03 **
C/K=100	2	4,46 ns	2975,68 **	797,00 *	6348,55 **	6687,62 **
C/K=150	2	140,82 **	6903,48 **	738,01 *	12141,08 ns	13378,78 **
Resíduo	24	12,13	262,61	147,27	444,41	487,68
CV(%)		24,7	13,6	25,9	12,7	12,3

\* e \*\* - Significativo ao nível de 5 e 1% de significância pelo teste F

ns - Não significativo.

Quadro 8A – Resumo das análises de variância para a densidade, diâmetro, superfície radicular e razão de eficiência radicular (RER) de raízes de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de K aplicado

F.V	G.L	Quadrado Médio			
		Características radiculares			
		Densidade cm cm <sup>-3</sup>	Diâmetro mm	Sup. radicular cm <sup>2</sup> cm <sup>-3</sup>	RER de K µg cm <sup>-2</sup>
<b>LV</b>					
Compac (C)	2	303,4536 **	0,0256127 **	1,151829 **	17114,61 **
Dose K (K)	3	18,2647 *	0,0023395 ns	0,057862 ns	22669,55 **
C*K	6	8,6058 ns	0,0029105 ns	0,060022 ns	1738,88 ns
C/K=0	2	52,7700 **	0,0000058 ns	0,386740 **	569,84 ns
C/K=50	2	147,9233 **	0,0134991 **	0,621691 **	5399,65 *
C/K=100	2	62,5733 **	0,0122114 **	0,158842 *	6082,13 *
C/K=150	2	66,0044 **	0,0086281 *	0,164621 *	10279,63 **
Resíduo	24	5,9866	0,0018130	0,0462058	1519,20
CV(%)		23,6	15,5	25,8	36,9
<b>LVA</b>					
Compac (C)	2	18,3033 *	0,0261715 **	0,087877 *	9302,84 **
Dose K (K)	3	48,7056 **	0,0020573 ns	0,476045 **	16028,71 **
C*K	6	11,4678 *	0,0025264 ns	0,074402 *	728,44 **
C/K=0	2	34,3344 **	0,0229021 **	0,082066 ns	1084,77 **
C/K=50	2	8,8344 ns	0,0020764 ns	0,199229 **	3558,87 **
C/K=100	2	4,9033 ns	0,0028120 ns	0,001562 ns	1380,87 **
C/K=150	2	4,6344 ns	0,0059601 *	0,028223 ns	5463,67 **
Resíduo	24	3,3399	0,0010699	0,025378	178,74
CV(%)		17,8	11,7	18,0	13,5

\* e \*\* - Significativo ao nível de 5 e 1% de significância pelo teste F

ns - Não significativo.

## APÊNDICE B

Quadro 1B - Matéria seca de raiz, folha, caule, parte aérea e total de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, nas doses de P aplicado

Dens. do solo	Dose P	Matéria seca				
		Raiz	Folha	Caule	P. aérea	Total
g cm <sup>-3</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	g vaso <sup>-1</sup>				
<b>LV</b>						
0,91	0	0,022	0,083	0,000	0,083	0,105
	150	2,100	7,447	2,157	9,603	11,703
	300	3,737	12,515	6,372	18,888	22,625
	600	3,648	12,698	6,717	19,415	23,063
1,10	0	0,010	0,023	0,000	0,023	0,032
	150	1,692	6,677	2,182	8,860	10,553
	300	2,730	11,333	5,557	16,890	19,620
	600	4,270	13,142	7,040	20,182	24,452
1,30	0	0,010	0,017	0,000	0,017	0,027
	150	0,373	1,485	0,465	1,950	2,322
	300	1,940	8,817	4,267	13,083	15,023
	600	2,085	8,858	4,420	13,278	15,362
<b>DMS (5%)<sup>1/</sup></b>		0,82	1,57	1,55	2,58	3,19
<b>LVA</b>						
1,35	0	1,202	3,003	0,890	3,893	5,095
	100	1,858	6,952	3,390	10,343	12,200
	200	3,150	12,065	5,995	18,060	21,210
	400	4,798	13,710	7,993	21,703	26,500
1,55	0	0,882	2,920	0,938	3,857	4,740
	100	1,325	5,122	2,385	7,507	8,832
	200	1,933	8,960	4,870	13,830	15,762
	400	3,245	10,690	6,057	16,748	19,993
1,75	0	0,617	1,643	0,407	2,050	2,667
	100	1,888	7,305	3,660	10,965	12,852
	200	2,970	9,125	4,507	13,632	16,603
	400	3,720	11,603	6,375	17,978	21,698
<b>DMS (5%)<sup>1/</sup></b>		1,06	1,97	1,37	3,12	3,90

<sup>1/</sup> Diferença mínima significativa ao nível de 5% de significância (compactação/dose).

Quadro 2B - Conteúdo de P na raiz, folha, caule, parte aérea e total em plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, nas doses de P aplicado

Densidade do solo	Dose P	Componentes da planta				
		Raiz	Folha	Caule	P. aérea	Total
g cm <sup>-3</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg vaso <sup>-1</sup>				
<b>LV</b>						
0,91	0	0,025	0,107	0,000	0,107	0,132
	150	2,345	11,096	4,710	15,806	18,150
	300	4,794	19,635	10,267	29,902	34,697
	600	6,016	24,702	16,734	41,436	47,452
1,10	0	0,004	0,007	0,000	0,007	0,012
	150	1,755	12,117	3,124	15,241	16,996
	300	3,156	19,546	5,721	25,266	28,422
	600	6,899	26,628	13,417	40,046	46,945
1,30	0	0,011	0,005	0,000	0,005	0,017
	150	0,349	2,557	0,542	3,099	3,448
	300	2,285	18,925	5,019	23,944	26,229
	600	3,095	18,731	7,802	26,533	29,628
<b>DMS (5%)<sup>1/</sup></b>		1,32	3,86	4,50	6,56	7,27
<b>LVA</b>						
1,35	0	0,851	4,274	0,710	4,984	5,836
	100	2,661	15,646	10,901	26,547	29,208
	200	7,560	31,718	20,616	52,334	59,894
	400	13,221	57,756	28,470	86,226	99,447
1,55	0	0,594	3,712	0,650	4,362	4,956
	100	2,313	13,080	8,127	21,207	23,520
	200	4,319	37,091	17,687	54,778	59,097
	400	11,178	38,384	20,515	58,898	70,076
1,75	0	0,356	1,407	0,243	1,649	2,005
	100	2,720	15,343	12,201	27,543	30,263
	200	6,795	30,475	18,721	49,196	55,991
	400	13,045	47,275	27,589	74,864	87,909
<b>DMS (5%)<sup>1/</sup></b>		3,63	8,91	5,58	11,94	14,50

<sup>1/</sup> Diferença mínima significativa ao nível de 5% de significância (compactação/dose).

Quadro 3B - Densidade radicular, diâmetro, superfície radicular e razão de eficiência radicular (RER) de P de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, nas doses de P aplicado

Densidade do solo	Dose de P	Características radiculares			
		Dens. radicular	Diâmetro	Sup. radicular	RER de P
g cm <sup>-3</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	cm cm <sup>-3</sup>	mm	cm <sup>2</sup> cm <sup>-3</sup>	µg cm <sup>-2</sup>
<b>LV</b>					
0,91	0	1,8	0,199	0,11	0,70
	150	13,0	0,199	0,81	11,75
	300	15,3	0,209	1,01	17,36
	600	12,6	0,180	0,71	33,43
1,10	0	0,6	0,243	0,05	0,14
	150	7,9	0,259	0,65	12,89
	300	13,8	0,242	1,06	13,80
	600	11,6	0,311	1,15	21,70
1,30	0	0,6	0,240	0,04	0,20
	150	2,5	0,279	0,22	8,08
	300	6,5	0,307	0,62	21,96
	600	4,8	0,274	0,41	38,27
<b>DMS (5%)<sup>1/</sup></b>		2,77	0,079	0,29	8,15
<b>LVA</b>					
1,35	0	6,5	0,279	0,57	4,32
	100	11,4	0,186	0,66	23,74
	200	13,4	0,220	0,92	32,58
	400	19,7	0,221	1,38	38,24
1,55	0	6,2	0,242	0,47	3,73
	100	8,2	0,237	0,61	21,14
	200	11,2	0,252	0,88	33,67
	400	16,8	0,252	1,33	26,47
1,75	0	1,4	0,376	0,16	7,01
	100	8,2	0,404	1,06	15,12
	200	10,9	0,313	1,08	26,67
	400	11,4	0,279	1,00	44,18
<b>DMS (5%)<sup>1/</sup></b>		3,28	0,104	0,35	10,64

<sup>1/</sup> Diferença mínima significativa ao nível de 5% de significância (compactação/dose).

Quadro 4B – Matéria seca de raiz, folha, caule, parte aérea e total de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, nas doses de K aplicado

Dens. do solo	Dose K	Matéria seca				
		Raiz	Folha	Caule	P. aérea	Total
g cm <sup>-3</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	----- g vaso <sup>-1</sup> -----				
<b>LV</b>						
0,91	0	4,413	9,160	4,387	13,547	17,960
	50	5,587	12,083	6,733	18,817	24,403
	100	3,873	12,657	7,533	20,190	24,063
	150	3,940	12,487	6,680	19,167	23,107
1,10	0	3,553	9,667	5,020	14,687	18,240
	50	4,530	12,230	6,640	18,870	23,400
	100	3,357	12,483	5,533	18,017	21,373
	150	2,767	11,563	5,650	17,213	19,980
1,30	0	0,610	2,475	0,845	3,320	3,930
	50	0,877	3,817	1,563	5,380	6,257
	100	2,690	8,690	2,960	11,650	14,340
	150	1,940	8,817	4,267	13,083	15,023
<b>DMS (5%)<sup>1/</sup></b>		2,02	2,09	1,81	3,50	4,92
<b>LVA</b>						
1,35	0	3,423	10,503	6,070	16,573	19,997
	50	4,057	11,907	7,207	19,113	23,170
	100	3,030	10,787	7,090	17,877	20,907
	150	2,847	11,683	5,400	17,083	19,930
1,55	0	1,507	3,933	1,847	5,780	7,287
	50	2,350	8,273	4,493	12,767	15,117
	100	2,720	9,860	4,800	14,660	17,380
	150	1,710	8,373	4,617	12,990	14,700
1,75	0	1,527	5,147	2,107	7,253	8,780
	50	3,643	7,600	4,257	11,857	15,500
	100	3,293	9,133	5,647	14,780	18,073
	150	3,100	8,700	4,187	12,887	15,987
<b>DMS (5%)<sup>1/</sup></b>		1,06	2,59	1,91	3,87	4,18

<sup>1/</sup> Diferença mínima significativa ao nível de 5% de significância (compactação/dose).

Quadro 5B - Conteúdo de K na raiz, folha, caule, parte aérea e total em plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, nas doses de K aplicado

Dens. do solo	Dose K	Componentes da planta				
		Raiz	Folha	Caule	P. aérea	Total
g cm <sup>-3</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg vaso <sup>-1</sup>				
<b>LV</b>						
0,91	0	8,90	38,17	11,29	49,46	58,36
	50	16,90	65,23	23,67	88,90	105,80
	100	18,97	119,91	49,40	169,31	188,28
	150	23,45	133,44	61,07	194,51	217,96
1,10	0	10,02	54,05	19,74	73,79	83,80
	50	20,84	106,61	37,26	143,86	164,70
	100	23,65	171,10	53,48	224,58	248,23
	150	16,65	205,74	74,04	279,77	296,43
1,30	0	3,67	21,35	7,26	28,61	32,28
	50	6,52	59,65	17,25	76,90	83,41
	100	18,61	128,49	34,08	162,57	181,17
	150	13,84	203,83	58,60	262,43	276,27
<b>DMS (5%)</b> <sup>1/</sup>		7,00	26,61	12,53	27,55	30,41
<b>LVA</b>						
1,35	0	9,558	73,377	27,266	100,643	110,201
	50	14,405	109,870	52,699	162,569	176,975
	100	19,482	195,954	90,884	286,838	306,319
	150	27,825	227,742	78,000	305,743	333,568
1,55	0	2,697	25,747	7,156	32,903	35,599
	50	11,241	96,362	42,688	139,049	150,290
	100	17,794	167,730	62,691	230,421	248,215
	150	14,140	181,479	65,145	246,625	260,764
1,75	0	2,899	27,681	7,486	35,167	38,066
	50	10,447	60,641	18,449	79,090	89,538
	100	17,114	133,074	62,615	195,689	212,804
	150	21,581	131,822	46,792	178,614	200,194
<b>DMS (5%)</b> <sup>1/</sup>		7,09	33,03	24,73	42,96	45,01

<sup>1/</sup> Diferença mínima significativa ao nível de 5% de significância (compactação/dose).

Quadro 6B - Densidade radicular, diâmetro, superfície radicular e razão de eficiência radicular (RER) de K de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, nas doses de K aplicado

Densidade do solo	Dose de K	Características radiculares			
		Densidade	Diâmetro	Sup. radicular	RER de K
g cm <sup>-3</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	cm cm <sup>-3</sup>	mm	cm <sup>2</sup> cm <sup>-3</sup>	µg cm <sup>-2</sup>
<b>LV</b>					
0,91	0	12,3	0,270	1,05	28,73
	50	15,3	0,227	1,10	49,40
	100	14,7	0,240	1,10	87,63
	150	15,2	0,213	1,02	103,21
1,10	0	9,2	0,271	0,77	55,25
	50	14,7	0,240	1,11	75,64
	100	10,3	0,283	0,87	156,41
	150	13,8	0,241	1,05	139,38
1,30	0	4,0	0,273	0,34	48,51
	50	2,9	0,349	0,31	132,40
	100	5,6	0,365	0,64	172,36
	150	6,5	0,317	0,63	217,72
<b>DMS (5%)</b> <sup>1/</sup>		4,99	0,087	0,44	79,44
<b>LVA</b>					
1,35	0	10,4	0,228	0,73	74,75
	50	10,3	0,279	0,90	99,17
	100	12,7	0,261	1,05	147,35
	150	13,2	0,220	0,91	182,46
1,55	0	6,3	0,227	0,45	40,49
	50	9,5	0,284	0,84	90,82
	100	11,8	0,273	1,00	123,81
	150	11,2	0,252	0,87	149,60
1,75	0	3,7	0,379	0,44	43,32
	50	12,8	0,326	1,31	35,78
	100	10,2	0,319	1,03	104,51
	150	10,9	0,308	1,06	97,81
<b>DMS (5%)</b> <sup>1/</sup>		3,72	0,067	0,32	27,24

<sup>1/</sup> Diferença mínima significativa ao nível de 5% de significância (compactação/dose).



## APÊNDICE C

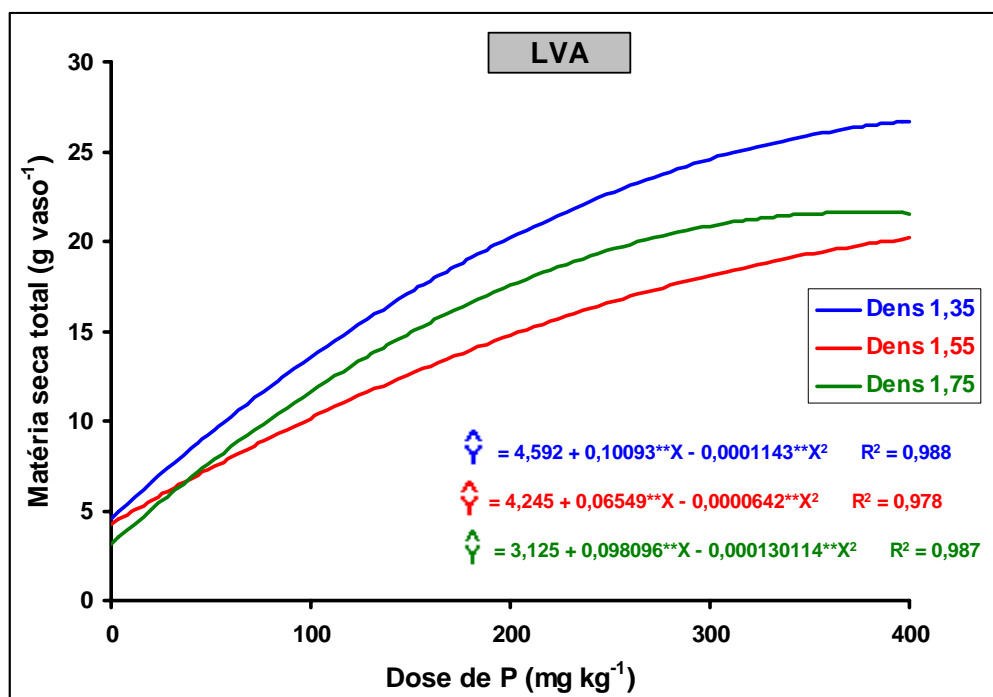
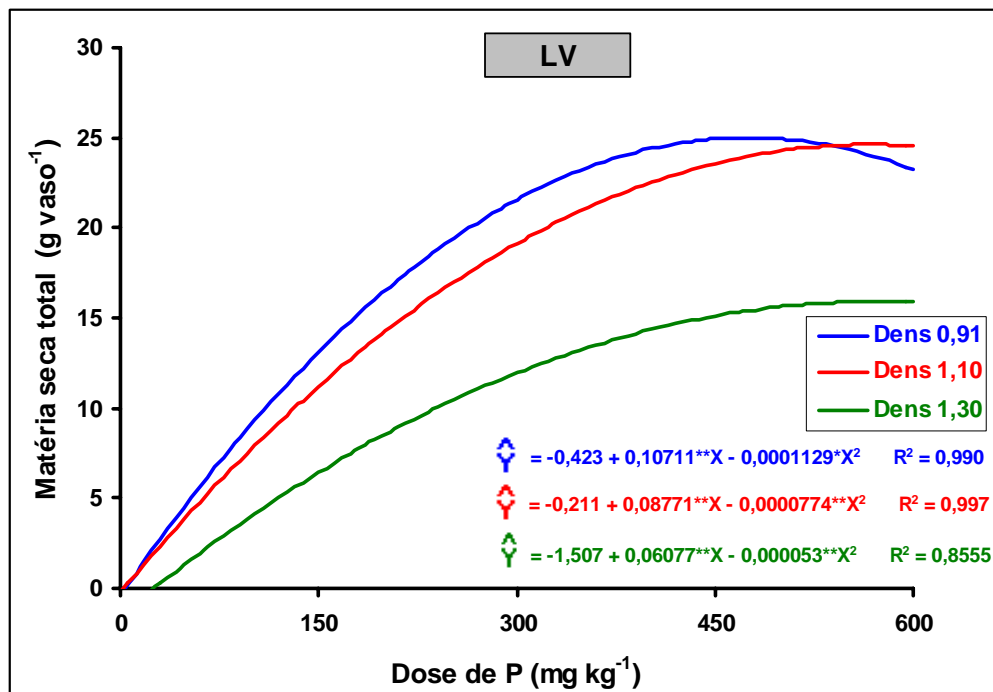


Figura 1C - Matéria seca total de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de P aplicado.

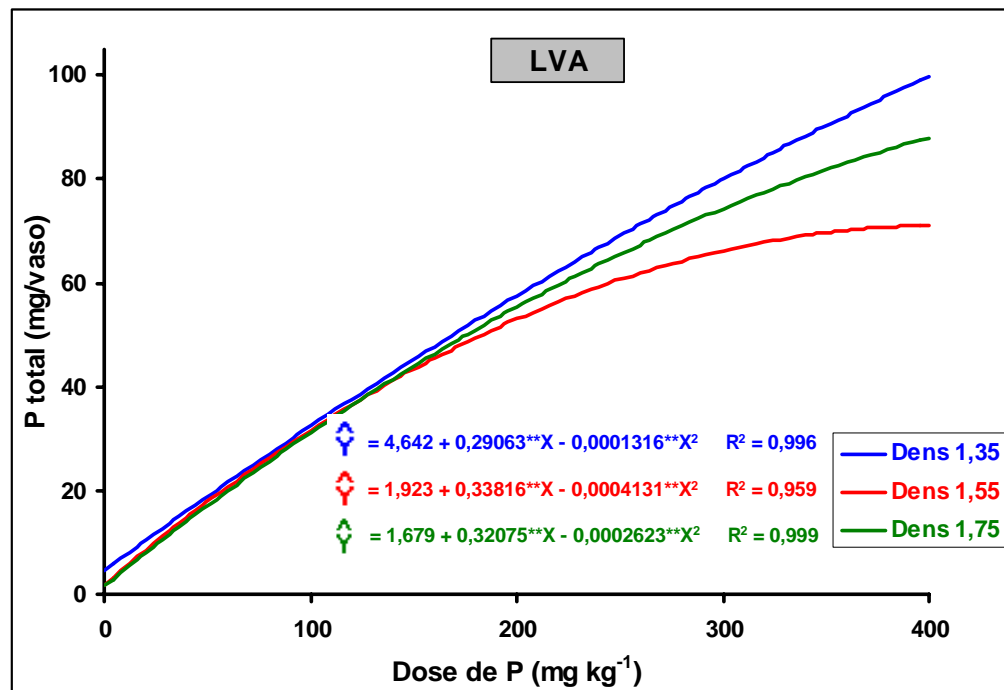
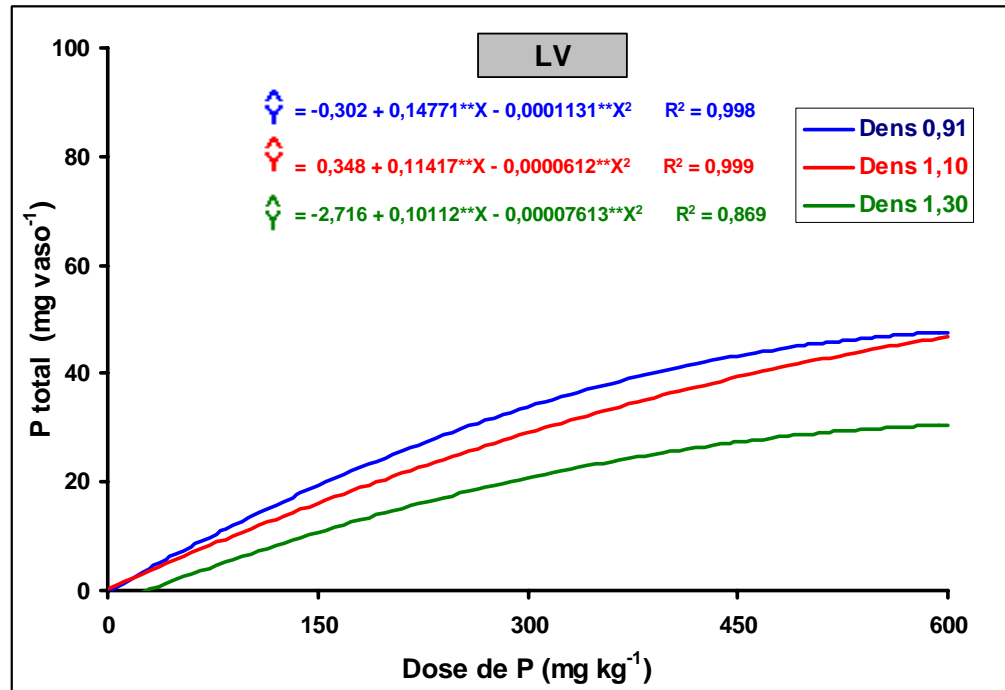


Figura 2C - Conteúdo de P em toda a planta de *E. camaldulensis*, cultivada por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de P aplicado.

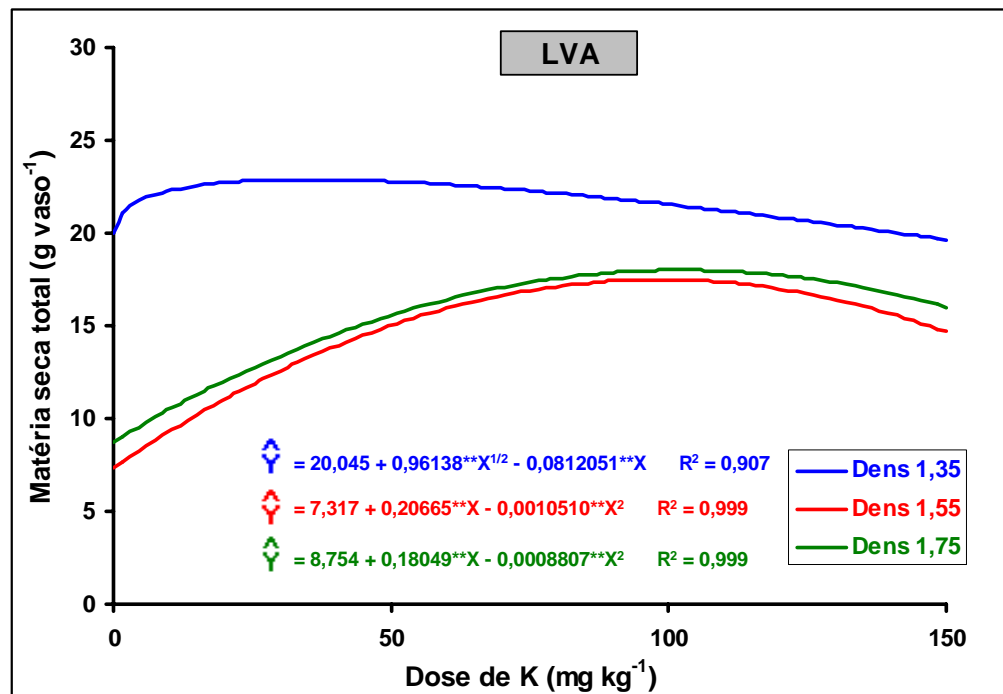
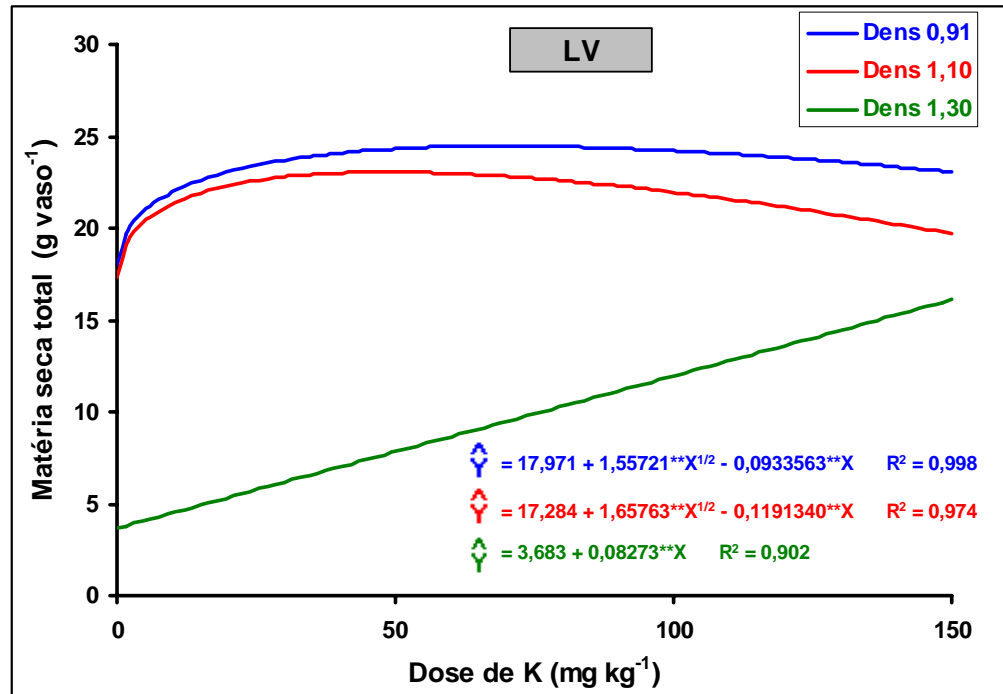


Figura 3C - Matéria seca total de plantas de *E. camaldulensis*, cultivadas por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de K aplicado.

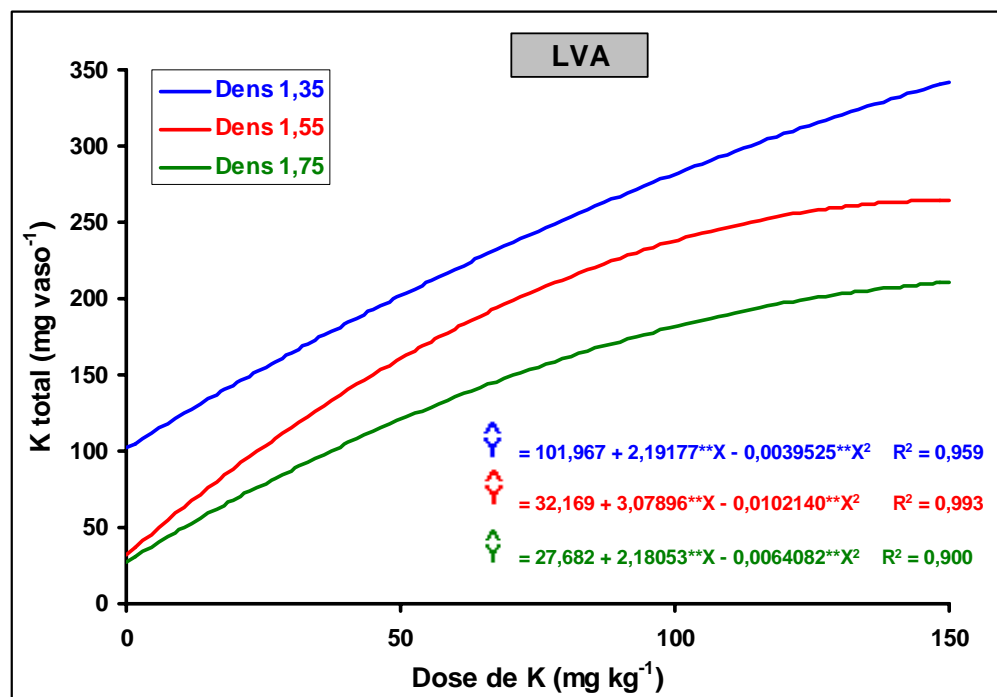
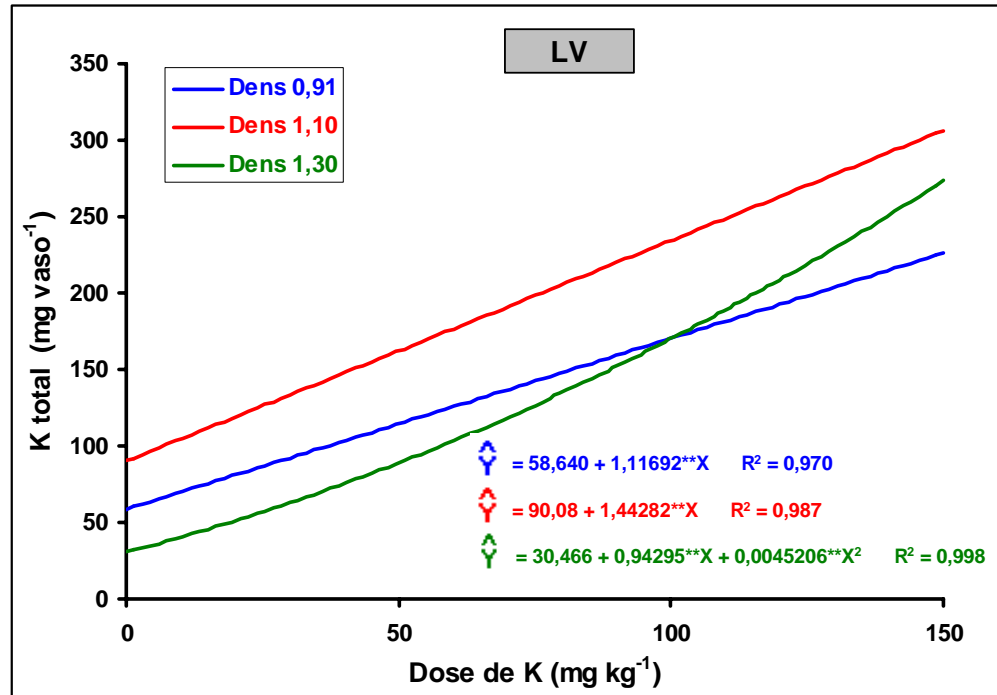


Figura 4C - Conteúdo de K em toda a planta de *E. camaldulensis*, cultivada por 100 dias em solos de Sete Lagoas (LV) e Três Marias (LVA) com diferentes densidades, em função das doses de K aplicado.