

SÉRGIO RICARDO SILVA

**EFEITOS DA COMPACTAÇÃO SOBRE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS,
QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS DE DOIS LATOSSOLOS E NO
CRESCIMENTO DE EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de "*Doctor Scientiae*".

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2005

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

S586e
2005

Silva, Sérgio Ricardo, 1974-

Efeitos da compactação sobre características físicas, químicas e microbiológicas de dois latossolos e no crescimento de eucalipto / Sérgio Ricardo Silva, – Viçosa : UFV, 2005.

xii, 97p. : il. ; 29cm.

Orientador: Nairam Félix Barros

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia

1. Plantas e solo. 2. Solos – Compactação. 3. Madeira - Exploração – Máquinas. 4. Física do solo. 5. Química do solo. 6. Microbiologia do solo. 7. Eucalipto - Crescimento. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 631.43

*“Gracias Padre, hoy te vengo a dar,
He venido hasta tus pies,
Sólo para agradecer,
Sólo para darte gracias
Pues no encuentro otras palabras en mi ser...”*
(Martin Valverde)

A Deus

Aos meus pais *Pedro e Marli*

Aos meus irmãos *Marcélio e Liliane*

À amada *Patrícia*

Aos meus amigos e familiares.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

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

À CENIBRA (Celulose Nipo-Brasileira S.A.), em especial ao Dr. Fernando Palha Leite, pela disponibilização da estrutura necessária para implementação dos experimentos de campo.

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

Aos amigos Eliel e Ednilson, pela amizade e inestimável colaboração na execução dos experimentos.

Aos funcionários da UFV, por toda ajuda, colaboração e convívio: Luciana, Denise, Sônia, Júnia, Cardoso, Beto, Geraldo, Cláudio, Bené, Carlinhos, Luizinho, Carlos Henrique (*in memória*), Zeila, Carlos Fonseca, Ciro, José Roberto e Tião (Solos); Domingos Sávio e Itamar (Fitotecnia); Júlio e Paulo Capelão (Geotecnia).

Aos professores Liovando Marciano da Costa, Eduardo de Sá Mendonça, Ivo Ribeiro da Silva, Hugo Alberto Ruiz, Victor Hugo Alvarez Venegas, Júlio César Lima Neves, Roberto Ferreira de Novais, Hermínia E. P. Martinez e Maria Catarina Megumi Kasuya pelas sugestões, pelos ensinamentos e pelo exemplo de profissionalismo.

Aos amigos e colegas da graduação e da pós-graduação, em especial Marcelo, Roberto, Fábio, André, Eduardo, Rosane, Janela, Leila, Gualter, Ermelinda, Rosi, Lafayete, Agno, Karine, Alcides, Arlindo, Alexandre, Donizete, Geraldo Erli, César, Michelle, Rodinei, Augusto, Dalton, Flances e Fabrício, e a tantos outros, pela convivência, pelo auxílio e pela amizade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida durante a pós-graduação.

Aos meus pais Pedro e Marli, pela vida, amor, carinho, educação, formação moral e religiosa, pelo apoio, incentivo e dedicação em todos os momentos da minha vida. Aos meus irmãos Marcélio e Liliane, pelo convívio e força nos momentos difíceis. E também ao meu sobrinho Tales, que veio renovar a alegria de nossa família.

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 nesta cidade 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 e monitor da disciplina SOL 375, Fertilidade do Solo, no período de julho a outubro de 1998.

Colou grau em outubro de 1998, ocasião em que 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. A seguir iniciou o Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, em nível de Doutorado, com área de concentração em Nutrição, Fertilização e Manejo de Solos Florestais, defendendo tese em fevereiro de 2005.

Em junho de 2004 foi contratado pela Veracel Celulose S.A., onde ocupa o cargo de Especialista em Solos, Nutrição e Manejo Florestal.

CONTEÚDO

	Página
RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
INTRODUÇÃO GERAL	1
LITERATURA CITADA	3
EXPERIMENTO 1	
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE DOIS LATOSSOLOS AFETADOS PELA COMPACTAÇÃO DO SOLO	
1. RESUMO.....	5
2. SUMMARY.....	6
3. INTRODUÇÃO.....	7
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	8
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	10
6. CONCLUSÕES.....	15
7. LITERATURA CITADA.....	15

EXPERIMENTO 2

FLUXO DIFUSIVO DE FÓSFORO, POTÁSSIO, ZINCO, COBRE, FERRO E MANGANÊS INFLUENCIADO PELA COMPACTAÇÃO DE DOIS LATOSSOLOS

1. RESUMO.....	18
2. SUMMARY.....	19
3. INTRODUÇÃO.....	20
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	22
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
6. CONCLUSÕES.....	29
7. LITERATURA CITADA.....	29

EXPERIMENTO 3

ATIVIDADE MICROBIANA E TRANSFORMAÇÕES DO CARBONO E NITROGÊNIO AFETADAS PELA COMPACTAÇÃO DO SOLO

1. RESUMO.....	32
2. SUMMARY.....	33
3. INTRODUÇÃO.....	34
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
6. CONCLUSÕES.....	44
7. LITERATURA CITADA.....	44

EXPERIMENTO 4

CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DE EUCALIPTO EM RESPOSTA A COMPACTAÇÃO DO SOLO EM DIFERENTES UMIDADES

1. RESUMO.....	47
2. SUMMARY.....	48
3. INTRODUÇÃO.....	49
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	50
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
6. CONCLUSÕES.....	59
7. LITERATURA CITADA.....	59

EXPERIMENTO 5

COMPACTAÇÃO DO SOLO INFLUENCIADA PELA INTENSIDADE DE TRÂNSITO E CARGA DE UM FORWARDER

1. RESUMO.....	62
2. SUMMARY.....	63
3. INTRODUÇÃO.....	64
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	65
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
6. CONCLUSÕES.....	70
7. LITERATURA CITADA.....	70

EXPERIMENTO 6

COMPACTAÇÃO DO SOLO E CRESCIMENTO DE EUCALIPTO EM RESPOSTA A INTENSIDADE DE TRÂNSITO E CARGA DE UM FORWARDER

1. RESUMO.....	74
2. SUMMARY.....	75
3. INTRODUÇÃO.....	76
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	78
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	80
6. CONCLUSÕES.....	90
7. LITERATURA CITADA.....	91
CONCLUSÕES GERAIS.....	96

RESUMO

SILVA, Sérgio Ricardo, D.S., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2005. **Efeitos da compactação sobre características físicas, químicas e microbiológicas de dois Latossolos e no crescimento de eucalipto.** Orientador: Nairam Félix de Barros. Conselheiros: Liovando Marciano da Costa e Eduardo de Sá Mendonça.

Durante a retirada de madeira de povoamentos florestais o tráfego de máquinas tem incrementado a compactação do solo, que altera propriedades físicas, químicas e microbiológicas do solo, prejudicando o crescimento de raízes e a produtividade do eucalipto. Este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da compactação sobre propriedades físicas, químicas e microbiológicas do solo, e crescimento do eucalipto; bem como a influência da intensidade de trânsito e carga de madeira de um forwarder sobre a compactação do solo. Para isso, foram desenvolvidos seis experimentos: quatro sob condições de laboratório e casa de vegetação e dois em condições de campo. No laboratório foram estudados os efeitos da compactação sobre propriedades físicas do solo, fluxo difusivo de nutrientes, atividade microbiana, mineralização de carbono e nitrogênio, e crescimento de raízes e do eucalipto. Os ensaios de campo avaliaram a compactação do solo e o crescimento de árvores de acordo com o número de passadas e a carga de madeira de um forwarder. Em laboratório a compactação aumentou a densidade do solo, microporosidade, resistência à penetração, retenção de água a 0,01 e 1,5 MPa;

fluxo difusivo de K, Zn, Cu, Fe e Mn (em geral); $N-NH_4^+$, $N-NO_3^-$ (no LVA), mineralização de N (no LA); e reduziu a porosidade total, macroporosidade, condutividade hidráulica, fluxo difusivo de P (no LVA), $N-NO_3^-$ (no LA), $C-CO_2$ (no LVA), C_{MIC} (no LA); matéria seca de raízes e total; densidade radicular e conteúdo de nutrientes na planta. Verificou-se que o solo caulínítico (LA) foi mais sensível à compactação do que o solo oxídico-gibbsítico (LVA). O trânsito do forwarder aumentou a densidade, microporosidade e a resistência do solo à penetração; reduziu a estabilidade de agregados em água, porosidade total, macroporosidade e a infiltração de água no solo. A compactação ocasionada pelo forwarder não alterou a produção de matéria seca de tronco e altura das plantas até 406 dias de idade. A maior parte dos efeitos da compactação foi manifestada por apenas duas ou quatro passadas do forwarder. Conclui-se que as modificações promovidas pela compactação na estrutura do solo, ocasionaram alterações nas propriedades físicas, químicas e microbiológicas, afetando os processos de transporte de água e nutrientes no solo, a ciclagem de C e N e o crescimento e nutrição do eucalipto, sendo a umidade do solo e a intensidade de trânsito os principais fatores que ampliaram esses efeitos.

ABSTRACT

SILVA, Sérgio Ricardo, D.S., Universidade Federal de Viçosa, February 2005.
Eucalypt growth and physical, chemical and microbiological characteristics as affected by soil compaction. Adviser: Nairam Félix de Barros. Committee members: Liovando Marciano da Costa and Eduardo de Sá Mendonça.

During timber exploitation the traffic of harvesting machines increases soil compaction, altering soil characteristics and impairing root growth and forest productivity. This work aimed to evaluate the effects of soil compaction on soils physical, chemical and microbiological characteristics, and eucalyptus growth as to evaluate soil compaction as affected by forwarder load and traffic intensity over two soil types (Red Yellow Latosol – LVA, and Yellow Latosol - LA). Six experiments were carried out: four under laboratory conditions and two in forested areas. The laboratory experiments aimed to evaluate the effects of soil compaction on soil physics properties, diffusive flux of nutrients, microbial activity, carbon and nitrogen mineralization, and eucalypt growth. The field trials evaluated soil compaction and tree growth as affected by the number of a forwarder passes and eucalypt wood load. Under controlled conditions, the compaction of both soils increased the bulk density, water-filled porosity, penetration resistance, water retention in soil; diffusive fluxes of K, Zn, Cu, Fe and Mn (in general); $N-NH_4^+$, $N-NO_3^-$ (in LVA), N mineralization (in LA); decreased the total porosity, aeration porosity, hydraulic conductivity, diffusive

flux of P (in LVA), N-NO_3^- (in LA), C-CO_2 (in LVA), C_{MIC} (in LA); root and shoot growth; root density and plant nutrient content. The caulinitic soil (LA) was more sensitive to soil compaction with regard to oxidic-gibbsitic soil (LVA). Forwarder traffic increased soil compaction, resistance to penetration and microporosity; and reduced aggregate stability, total porosity, macroporosity and infiltration rate. Under field conditions, soil compaction did not affect eucalypt height and stem dry matter until 406 days old. The disturbances were strong regardless the number of forwarder passes. This study indicated that soil compaction can to alter the soil structure and physical, chemical and microbiological properties, to impair water and nutrients transport in soil, turnover of C and N, and eucalypt growth and nutrition. Soil moisture and traffic intensity were the principal factors favouring these negative effects.

INTRODUÇÃO GERAL

O constante e significativo aumento do peso dos equipamentos florestais, registrado nas últimas décadas, preocupam, pois durante a retirada de madeira de povoamentos as máquinas trafegam numa mesma linha várias vezes, o que pode causar a compactação do solo (Balbuena et al., 2000; Nugent et al., 2003). Como consequência, o crescimento das árvores pode ser prejudicado (Startsev & McNabb, 2000).

O trânsito repetido em uma mesma área intensifica os danos à estrutura do solo com consequente redução do rendimento das culturas tanto no primeiro ano de produção, como nos anos posteriores (Hakansson & Reeder, 1994; Lal, 1996; Jorajuria et al., 1997). O grau de compactação, além do número de passadas, pode também ser afetado pelo peso de madeira transportada, sendo que a deformação ocorrerá quando as pressões aplicadas ao solo excederem à sua capacidade de suporte de carga.

A compactação influi nas propriedades e funções físicas, químicas e biológicas do solo, sendo uma das importantes causas da degradação dos solos agrícolas no mundo (Hakansson et al., 1988; Hakansson & Voorhees, 1998). Ela pode afetar a ciclagem de C e N pela mudança da aeração do solo e da estrutura da comunidade microbiana, podendo retardar a decomposição da matéria orgânica e aumentar as perdas gasosas de N (Breland & Hansen, 1996; Jensen et al., 1996).

A compactação aumenta a densidade e a resistência do solo à penetração e reduz a macroporosidade, aeração, infiltração e armazenamento de água no solo (Alakukku & Elonen, 1994; Panayiotopoulos et al., 1994; Ishaq et al., 2001a). A redução da infiltração de água no solo, decorrente da compactação da camada superficial, pode resultar em aumento do escoamento superficial e erosão (Kayombo & Lal, 1994). O aumento da resistência do solo à penetração pode ser restritivo ao crescimento radicular acima de certos valores, que variam de 2,0 a 4,0 MPa (Oussible et al., 1992; Arshad et al., 1996).

A compactação pode reduzir o crescimento de plantas por seu efeito adverso sobre o crescimento de raízes e conseqüente redução na absorção de água e de nutrientes (Nadian et al., 1996; Ishaq et al., 2001b; Silva et al., 2002). Além disso, a compactação pode interferir na movimentação de água e de nutrientes no solo, reduzindo a disponibilidade dos mesmos para as plantas. 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 (Novais & Smyth, 1999). Portanto, pode-se antecipar que em solos compactados a produtividade florestal pode ser comprometida temporariamente ou de maneira permanente.

Este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da compactação sobre características físicas, químicas e microbiológicas do solo, e sobre o crescimento do eucalipto, bem como a influência da intensidade de trânsito e carga de madeira de um forwarder sobre a compactação do solo.

LITERATURA CITADA

- ALAKUKKU, L. & ELONEN, P. Finish experiment on subsoil compaction by vehicles with high axle load. *Soil Till. Res.*, 29:151-155, 1994.
- ARSHAD, M.A.; LOWERY, B. & GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., eds. *Methods for assessing soil quality*. Madison, Soil Science Society of America. 1996. p. 123-141 (SSSA Special publication 49).
- BALBUENA, R.H.; TERMINIELLO, A.M.; CLAVERIE, J.A.; CASADO, J.P. & MARLATS, R. Compactación del suelo durante la cosecha forestal. Evolución de las propiedades físicas. *R. Bras. Eng. Agric. Ambient.*, 4:453-459, 2000.
- BRELAND, T.A. & HANSEN, S. Nitrogen mineralization and microbial biomass as affected by soil compaction. *Soil Biol. Biochem.*, 28:655-663, 1996.
- HAKANSSON, I.; VOORHEESS, W.B. & RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop responses in different traffic regimes. *Soil Till. Res.*, 11:239-282, 1988.
- HAKANSSON, I. & REEDER, R.C. Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response. *Soil Till. Res.*, 29:277-304, 1994.
- HAKANSSON, I. & VOORHEES, W.B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTINE, C. & STEWARD, B.A., eds. *Methods for assessment of soil degradation*. Advances in soil science. Boca Raton, CRC Press, 1998. p.167-179.

- ISHAQ, M.; HASSAN, A.; SAEED, M.; IBRAHIM, M. & LAL, R. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan. I. Soil physical properties and crop yield. *Soil Till. Res.*, 59:57-65, 2001a.
- ISHAQ, M.; IBRAHIM, M.; HASSAN, A.; SAEED, M. & LAL, R. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan: II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. *Soil Till. Res.*, 60:153-161, 2001b.
- JENSEN, L.S.; McQUEEN, D.J.; ROSS, D.J. & TATE, K.R. Effects of soil compaction on N-mineralization and microbial-C and -N. II. Laboratory simulation. *Soil Till. Res.*, 38:189-202, 1996.
- JORAJURIA, D.; DRAGHI, L. & ARAGON, A. The effect of vehicle weight on the distribution of compaction with depth and the yield of *Lolium/Trifolium* grassland. *Soil Till. Res.*, 41:1-12, 1997.
- KAYOMBO, B. & LAL, R. Responses of tropical crops to soil compaction. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.287-316.
- LAL, R. Axle load and tillage effects on crop yields on a Mollic Ochraqualf in northwest Ohio. *Soil Till. Res.*, 37:143-160, 1996.
- 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. & SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.
- NUGENT, C.; KANALI, C.; OWENDE, P.M.O.; NIEUWENHUIS, M. & WARD, S. Characteristic site disturbance due to harvesting and extraction machinery traffic on sensitive forest sites with peat soils. *For. Ecol. Manage.*, 180:85-98, 2003.
- OUSSIBLE, M.; CROOKSTON, P.K. & LARSON, W.E. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat. *Agron. J.*, 84:34-38, 1992.
- PANAYITOPOULOS, K.P.; PAPADOPOULOU, C.P. & HATJIOANNIDOU, A. Compaction and penetration resistance of an Alfisol and Entisol and their influence on root growth of maize seedlings. *Soil Till. Res.*, 31:323-337, 1994.
- SILVA, S.R.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. & PEREIRA, P.R.G. Eficiência nutricional de potássio e crescimento de eucalipto influenciados pela compactação do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:1001-1010, 2002.
- STARTSEV, A.D. & McNABB, D.H. Effects of skidding on forest soil infiltration in west-central Alberta. *Can. J. Soil Sci.*, 80:617-624, 2000.

EXPERIMENTO 1

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE DOIS LATOSSOLOS AFETADOS PELA COMPACTAÇÃO DO SOLO

RESUMO

A compactação altera as propriedades físicas do solo, especialmente a estrutura e porosidade, prejudicando a infiltração de água e o desenvolvimento radicular. Este trabalho foi realizado sob condições controladas para avaliar os efeitos da compactação sobre características físicas de dois Latossolos com distintas mineralogias. Foram utilizados um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) oxidico-gibbsítico, e um Latossolo Amarelo (LA) caulínico. O ensaio consistiu de oito tratamentos para cada solo, correspondendo a oito níveis de compactação. Os tratamentos, com cinco repetições, foram dispostos em delineamento em blocos casualizados. A unidade experimental foi composta por anel de PVC com 6 cm de altura e 4,55 cm de diâmetro interno, com volume útil de 97,6 cm³. Calculou-se a quantidade de cada solo para ocupar o volume de 97,6 cm³ e atingir as densidades de 1,05 e 1,10 kg dm⁻³, respectivamente, no LVA e LA. A seguir, as amostras de solo foram umedecidas (0,20 kg kg⁻¹ = 100 % do equivalente de umidade), acondicionadas nos tubos de PVC e compactadas em uma prensa CBR equipada com anel dinamométrico. As pressões de compactação foram 0, 60, 120, 240, 360, 540, 720 e 900 kPa. Após a aplicação da pressão, determinou-se a densidade resultante por meio do novo volume ocupado pelo solo. Para a avaliação da condutividade hidráulica os tubos de PVC foram adaptados como permeômetros de carga constante. Nestas amostras foram mensuradas a microporosidade pelo método da mesa de tensão, a porosidade total e a macroporosidade. Após equilíbrio da umidade do solo a uma tensão de 0,006 MPa na mesa de tensão, foi medida a resistência do solo à penetração utilizando um penetrômetro eletrônico. O procedimento anterior de compactação do solo foi realizado novamente para a análise de agregados estáveis em água e obtenção do diâmetro médio geométrico. A retenção de água a 0,01 e 1,5 MPa, em aparelho extrator de Richards, foi avaliada nos solos compactados utilizando-se anel de PVC com 1,9 cm de altura e 4,55 cm

de diâmetro interno. O solo caulínítico foi mais sensível à compactação do que o solo oxidico-gibbsítico. O incremento da microporosidade com a compactação aumentou a retenção de água no solo nas tensões de 0,01 e 1,5 MPa, tanto em base volumétrica como em base gravimétrica, no entanto esse aumento não se expressou em termos de conteúdo de água disponível no solo. A condutividade hidráulica e a resistência à penetração foram as propriedades do solo que apresentaram maior sensibilidade aos efeitos da compactação, com maior potencial de uso para a avaliação da qualidade estrutural do solo.

Termos para indexação: Densidade do solo, condutividade hidráulica, porosidade do solo, resistência à penetração, retenção de água no solo, agregados estáveis em água.

SUMMARY: Physical characteristics of two Latosols as affected by soil compaction.

Soil compaction affect the physical properties, specially soil structure and porosity, which impair water infiltration and root growth. An experiment was carried out under controlled conditions in order to evaluate the effects of soil compaction on soil physical characteristics of two Latosols with distinct mineralogies. An oxidic-gibbsitic Red Yellow Latosol (LVA) and a caulinitic Yellow Latosol (LA) were used. The experiment consisted of eight treatments applied to each soil, corresponding to eight levels of pressure applied to compact the soil. The treatments, with five replicates, were disposed in a randomized block design. The experimental unit was composed by a PVC pipe (6 cm in height and 4.55 cm of internal diameter), with an effective volume of 97.6 cm³. A quantity of soil was calculated to occupy 97.6 cm³ and reach the density bulk of 1.05 and 1.10 kg dm⁻³, respectively in the LVA and in the LA. Subsequently, the soil samples were moistened to field capacity (0.20 kg kg⁻¹), placed in pots of PVC pipe and compacted using a CBR press. The pressure applied were 0, 60, 120, 240, 360, 540, 720 e 900 kPa. After soil compaction, the bulk density was calculated according to the new volume occupied by the soil. The PVC pipes were adapted as permeameters with constant water head, to the determination of the hydraulic conductivity. In these samples were evaluated: microporosity, macroporosity and total porosity. The soil penetration

resistence was measured after equilibrium of soil moisture at the tension of 0.006 MPa. The analysis of water-stable aggregates was carried out using soil samples compacted as previously described. Soil water retention at 0.01 and 1.5 MPa was evaluate using the samples compacted in the PVC pipe (1.9 cm in height and 4.55 cm of internal diameter). The caulinitic soil was more sensitive to soil compaction with regard to oxidic-gibbsitic soil. The increase of microporosity with soil compaction increased the 0.01 and 1.5 MPa water retention in soil in both, volumetric and gravimetric basis, however no affected available water holding capacity. The properties of soil which have higher potential use to evaluate the effects of soil compaction were hydraulic conductivity and penetration resistance.

Index terms: Soil bulk density, hydraulic conductivity, soil porosity, penetration resistance, water retention in soil, water-stable aggregates.

INTRODUÇÃO

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

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 & Allmaras, 1987; Curi et al., 1993; Dias Júnior & Pierce, 1996). A elevação da densidade do solo prejudica o desenvolvimento das plantas, ocasiona aumento da resistência mecânica à penetração de raízes, altera a movimentação de água e de nutrientes e a difusão de oxigênio e outros gases, levando ao acúmulo de CO₂ e fitotoxinas (Marschner, 1995; Nadian et al., 1996; Borges et al., 1997; Mapfumo et al., 1998).

A intensidade de mudanças em propriedades físicas do solo provocadas pela compactação indica a sensibilidade do solo aos impactos de técnicas de manejo e fornece informação sobre a sua capacidade em manter determinada função, como reter e fornecer água e nutrientes às plantas (McQueen & Shepherd, 2002). Assim, avaliações como: agregados estáveis

em água (Silva et al., 2000; Beutler et al., 2001), densidade, porosidade e condutividade hidráulica do solo (Marsili et al., 1998; Ishaq et al., 2001; McQueen & Shepherd, 2002), têm sido utilizadas como indicadores físicos da qualidade do solo, constituindo importante estratégia para avaliar alterações de suas propriedades.

A redução da infiltração de água no solo, decorrente da compactação da camada superficial, pode resultar em aumento do escoamento superficial e erosão (Kayombo & Lal, 1994). Por sua vez, o aumento da resistência do solo à penetração, pode ser restritivo ao crescimento radicular, quando acima de certos valores, que variam de 1,5 a 4,0 MPa (Oussible et al., 1992; Grant & Lafond, 1993; Arshad et al., 1996).

Os objetivos deste trabalho foram avaliar os efeitos da compactação sobre propriedades físicas de dois Latossolos com mineralogias distintas e definir as características físicas do solo que apresentam maior sensibilidade para avaliação destes efeitos.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados dois solos com mineralogia distinta, um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) oxídico-gibbsítico e um Latossolo Amarelo (LA) caulínítico. Os solos foram coletados em povoamentos de eucalipto, na profundidade de 0-15 cm, secos ao ar, passados em peneira de 4 mm de malha e homogeneizados, para posterior análise química e física (Quadro 1).

O ensaio consistiu de oito tratamentos para cada solo, correspondendo a oito pressões de compactação: 0, 60, 120, 240, 360, 540, 720 e 900 kPa. Os tratamentos, com cinco repetições, foram dispostos em delineamento em blocos casualizados. A unidade experimental foi composta por anel de PVC com 6 cm de altura e 4,55 cm de diâmetro interno, com volume útil de 97,6 cm³.

Calculou-se a quantidade de cada solo para ocupar o volume de 97,6 cm³ e atingir as densidades de 1,05 e 1,10 kg dm⁻³, respectivamente, no LVA e LA. A seguir as amostras de solo foram umedecidas (0,20 kg kg⁻¹ = 100 % do equivalente de umidade), acondicionadas nos vasos e compactadas em uma prensa CBR equipada com anel dinamométrico. Foi calculada a densidade do solo resultante da compactação, por meio do novo volume ocupado por ele.

Quadro 1. Caracterização dos solos utilizados no experimento

Característica	LVA	LA
COT (dag kg ⁻¹) ⁽¹⁾	2,76	2,20
N-total (dag kg ⁻¹) ⁽²⁾	0,15	0,13
Equivalente de umidade (kg kg ⁻¹)	0,2	0,2
Densidade do solo (kg dm ⁻³)	1,05	1,10
Argila (g kg ⁻¹)	470	510
Silte (g kg ⁻¹)	90	40
Areia (g kg ⁻¹)	440	450
Classe textural	Argila	Argila
SiO ₂ (g kg ⁻¹) ⁽³⁾	71,29	135,19
Al ₂ O ₃ (g kg ⁻¹) ⁽³⁾	172,93	139,99
Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹) ⁽³⁾	60,64	44,64
Classe mineralógica	Oxídico-gibbsítico	Caulinítico

⁽¹⁾ Carbono orgânico total (Yeomans & Bremner, 1988); ⁽²⁾ Nitrogênio total (Bremner & Mulvaney, 1982); ⁽³⁾ Elementos no extrato do ataque sulfúrico (EMBRAPA, 1997).

Para a avaliação da condutividade hidráulica os tubos de PVC foram adaptados como permeômetros de carga constante, sendo a condutividade hidráulica obtida pela aplicação da equação de Darcy, após os valores de fluxo atingirem a estabilidade (EMBRAPA, 1997). Nestas amostras foi mensurada a microporosidade pelo método da mesa de tensão, e calculadas a porosidade total e a macroporosidade (EMBRAPA, 1997). Após equilíbrio da umidade do solo a uma tensão de 0,006 MPa, na mesa de tensão, foi medida a resistência do solo à penetração utilizando um penetrômetro eletrônico com velocidade constante de penetração de 2 cm min⁻¹ e um cone com diâmetro de base de 4 mm e semi-ângulo de 30°. Esse penetrômetro estava equipado com um atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplado a um microcomputador para aquisição dos dados. No centro geométrico de cada amostra, na profundidade de 5 a 55 mm, uma leitura de resistência foi obtida a cada 0,31 mm, perfazendo um total de 160 leituras, as quais foram utilizadas para calcular a média da resistência do solo à penetração de cada amostra.

O procedimento de compactação do solo, descrito anteriormente, foi realizado novamente para posterior análise de agregados estáveis em água (EMBRAPA, 1997) e obtenção do diâmetro médio geométrico segundo Kemper & Rosenau (1986).

A retenção de água no solo a 0,01 e 1,5 MPa de tensão foi avaliada utilizando-se anel de PVC com 1,9 cm de altura e 4,55 cm de diâmetro interno, com volume útil de 30,9 cm³. A compactação do solo foi realizada de modo idêntico ao descrito anteriormente, no entanto, com 6 blocos (repetições). A seguir, as amostras de solo (individualmente por bloco com todos os tratamentos) foram saturadas e transferidas para o aparelho extrator de Richards, onde foram submetidas sucessivamente às tensões de 0,01 e 1,5 MPa até atingir a drenagem máxima (EMBRAPA, 1997). A água disponível no solo (ADS) foi obtida pela diferença entre a água retida a 0,01 e 1,5 MPa.

Os resultados foram submetidos, individualmente para cada solo, à análise de variância, de correlação e de regressão. Para a escolha dos modelos de regressão, os coeficientes foram testados pelo teste F com base no quadrado médio do resíduo da ANOVA do experimento. Finalmente, para dois ou mais modelos com coeficientes significativos, a seleção foi feita com base no maior coeficiente de determinação (R²).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve aumento da densidade do solo (D_S) em resposta às pressões de compactação (Figura 1). Este aumento atingiu 27 e 37 % com maior pressão (900 kPa), respectivamente, no LVA e LA. O menor aumento D_S no LVA pode ser devido à sua mineralogia, pois os óxidos de Fe e Al, predominantes em sua composição, associam-se com argilas silicatadas formando agregados pequenos e extremamente estáveis com maior resistência à deformação quando sujeitos à pressão. Por sua vez, no LA a caulinita se modela e, ou, deforma mais facilmente do que os óxidos, facilitando o adensamento do solo.

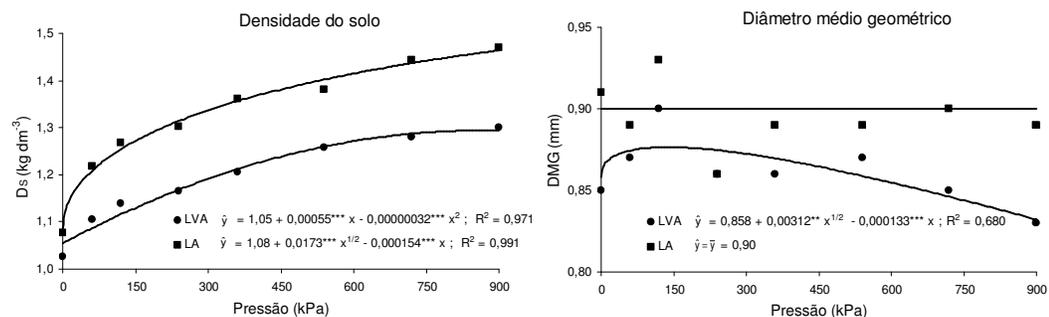


Figura 1. Densidade e diâmetro médio geométrico de agregados de dois Latossolos compactados com diferentes pressões.

O diâmetro médio geométrico (DMG) dos agregados no LVA aumentou com a compactação do solo em níveis intermediários de pressão, decrescendo a seguir para maiores pressões (Figura 1). Este aumento atingiu 6 % no LVA (pressão = 120 kPa). Pode-se atribuir esse resultado à provável agregação mecânica do LVA por efeito da pressão exercida pela compactação, levando à junção de partículas sob alta umidade no solo. O DMG não se mostrou um bom indicador dos efeitos da compactação do solo, principalmente no LA.

A compactação acarretou decréscimo da porosidade total (17 e 23 %) e da macroporosidade (53 e 67 %) e aumento da microporosidade nos dois solos (35 e 32 %, respectivamente, no LVA e LA, na pressão de 900 kPa) (Figura 2). Constatou-se que a macroporosidade apresentou correlação significativa ($p < 0,001$) e negativa com a densidade e com a microporosidade ($r = -0,96$ no LVA e $-0,99$ no LA), ou seja, a compactação proporcionou modificação do sistema poroso, transformando uma fração dos macroporos em microporos.

Marsili et al. (1998) verificaram decréscimo da macroporosidade na camada superficial (0-10 cm) depois de uma passada de dois tratores, cujo efeito foi intensificado por 4 passadas das máquinas. Wagger & Denton (1989) observaram que a porosidade total na área de solo trafegado foi 21 % menor do que na posição não trafegada.

A compactação proporcionou aumento da retenção de água pelo solo a 0,01 e 1,5 MPa de tensão, tanto em base volumétrica (θ_{vol}) como gravimétrica (θ_{grav}) (exceção para 0,01 MPa em base gravimétrica no LA) (Figura 2). O aumento da θ_{vol} atingiu 38 e 43 % a 0,01 MPa, e 51 e 65 % a 1,5 MPa, respectivamente, no LVA e LA (pressão = 900 kPa). A θ_{grav} a 0,01 MPa aumentou 7 % no LVA (pressão = 540 kPa) e decresceu 8 % no LA (pressão = 720 kPa); sendo que, a 1,5 MPa, houve aumento de 11 % da θ_{grav} nos dois solos, por efeito da maior compactação (900 kPa). Houve maior aumento da retenção de água na tensão de 1,5 MPa, o que indica que a modificação do sistema poroso pela compactação beneficiou especialmente a formação de poros capilares menores, onde a água é retida com mais energia.

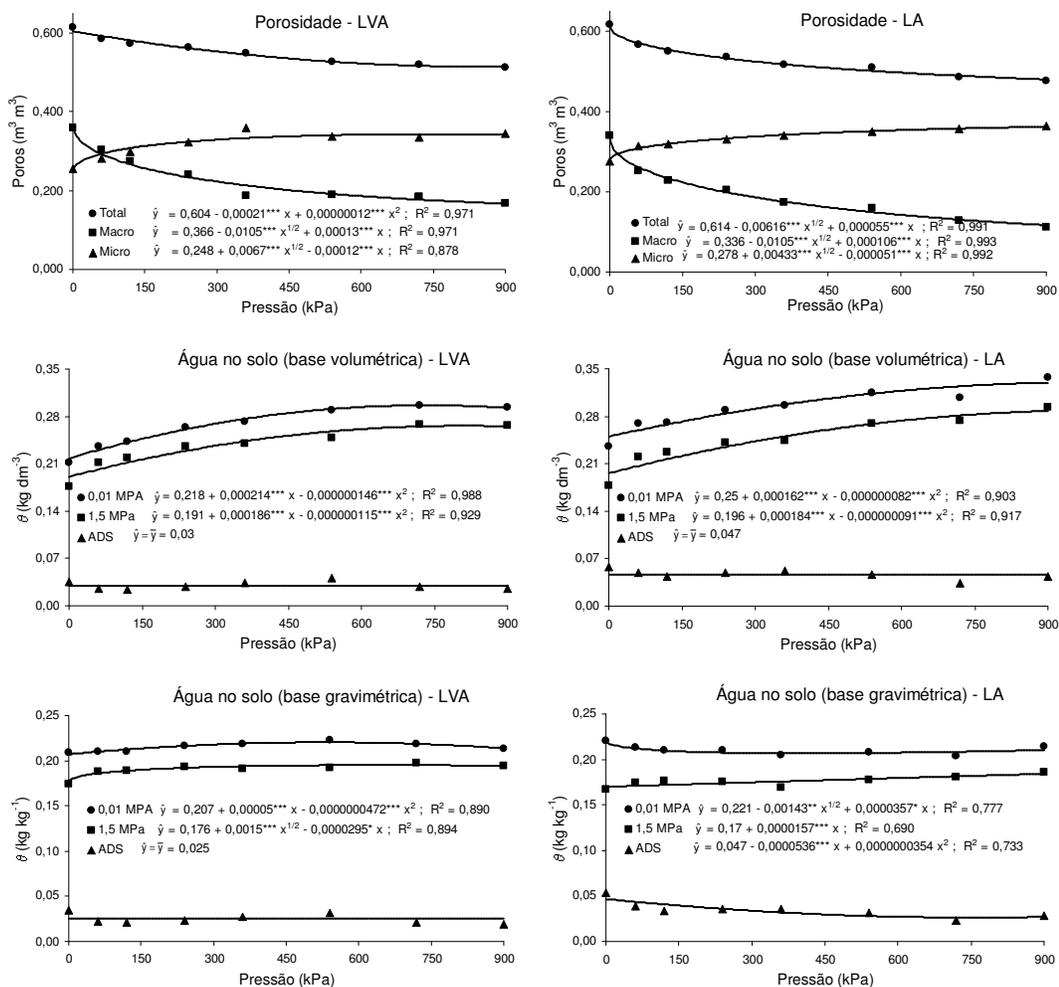


Figura 2. Porosidade, retenção de água a 0,01 e 1,5 MPa e água disponível no solo (ADS) de dois Latossolos compactados com diferentes pressões.

A microporosidade apresentou correlação significativa ($p < 0,001$) e positiva com a θ_{vol} a 0,01 MPa ($r = 0,75$ no LVA; e $r = 0,87$ no LA) e 1,5 MPa ($r = 0,76$ no LVA; e $r = 0,92$ no LA), e também com a θ_{grav} ($p < 0,005$) a 1,5 MPa ($r = 0,41$ no LVA; $r = 0,40$ no LA). O aumento da microporosidade com a compactação (Figura 2) colaborou para o incremento da retenção de água no solo nas tensões de 0,01 e 1,5 MPa, tanto em base volumétrica como em base gravimétrica, ou seja, houve aumento do volume de microporos (mais água armazenada por unidade de volume de solo) e da força de retenção (mais água armazenada por unidade de massa de solo).

É interessante observar que este aumento de retenção de água a 0,01 e 1,5 MPa não se expressou em termos de disponibilidade de água para as plantas, pois não houve diferença no conteúdo de água disponível no solo

(ADS) por efeito da compactação, exceção para θ_{grav} no LA, onde a redução da ADS foi de 48 %, após uma compactação de 900 kPa (Figura 2). Estes resultados não corroboram com a afirmação de Greacen & Sands (1980), de que o maior conteúdo volumétrico de água na capacidade de campo (0,01 MPa), em solo compactado, aumenta o volume de água por unidade de volume de solo que é disponível para as raízes das árvores.

Houve decréscimo da condutividade hidráulica (K_0) em resposta à compactação do solo (Figura 3). A redução da K_0 , em relação à testemunha não compactada, atingiu 94 e 99 %, respectivamente, no LVA e LA. Constatou-se que a K_0 apresentou correlação significativa ($p < 0,001$) e negativa com a densidade ($r = -0,80$ no LVA; e $r = -0,86$ no LA) e com a resistência à penetração ($r = -0,74$ no LVA; e $r = -0,69$ no LA); e positiva com a macroporosidade ($r = 0,81$ no LVA; e $r = 0,87$ no LA).

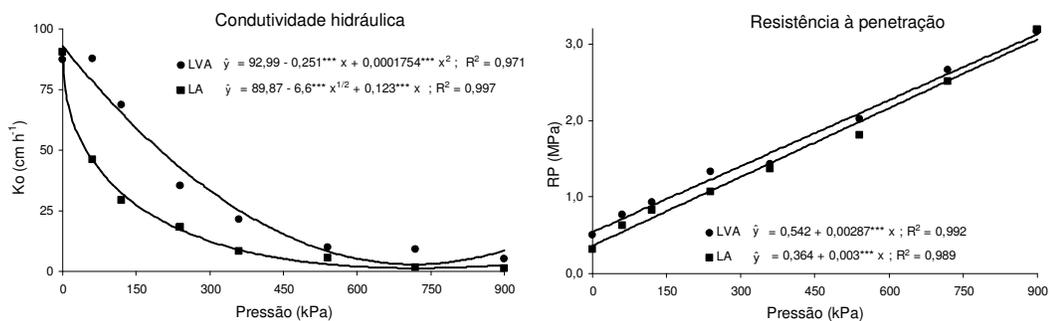


Figura 3. Condutividade hidráulica e resistência à penetração de dois Latossolos compactados com diferentes pressões.

Para menores pressões (60 a 360 kPa) a K_0 decresceu mais no LA, o que pode ser atribuído à mineralogia deste solo, pois a caulinita se modela e, ou, deforma mais facilmente do que os óxidos quando sujeita à pressão, facilitando a formação de selamento do solo e conseqüente redução da K_0 . Por sua vez, o LVA possui predomínio de óxidos de Fe e de Al, apresentando agregados pequenos e extremamente estáveis devido à associação destes óxidos com argilas silicatadas. Isto confere ao LVA maior resistência à deformação quando sujeito à pressão, o que explica a menor redução da K_0 em relação ao LA quando submetido a pressões de 60 a 360 kPa. No entanto, pressões superiores a 540 kPa foram altas o suficiente para igualar o grau de deformação destes solos e também a redução da K_0 .

A redução da condutividade hidráulica deve estar relacionada com a modificação do sistema poroso, ou seja, da distribuição do tamanho, alongação e continuidade vertical dos poros, ocasionada pela compactação do solo, como observado por Marsili et al. (1998). Segundo Silva et al. (1986), a redução da K_0 é atribuída ao decréscimo da macroporosidade com o aumento da densidade, uma vez que o movimento de água no solo está diretamente relacionado com a porosidade de drenagem. Dependendo do tipo de solo, um pequeno aumento da densidade causado pela compactação, pode diminuir a taxa de infiltração em até 80% (Oliveira et al., 1998).

A condutividade hidráulica de um solo é uma característica muito importante com relação ao armazenamento de água no solo e à erosão. Solos com menor K_0 estão mais sujeitos à erosão, devido à maior quantidade de água que permanece na superfície do solo e conseqüente aumento de escoamento superficial (Cerdà, 1996). Este volume de água que deixa de infiltrar-se é perdido e torna-se indisponível para as plantas.

Houve aumento linear da resistência à penetração (RP) do solo em resposta à compactação (Figura 3). O aumento da RP foi de 6,3 e 10,3 vezes, respectivamente, no LVA e LA, nos solos compactados com maior pressão (900 kPa). Os valores máximos de RP foram de 3,16 e 3,19 MPa, respectivamente, no LVA e LA. A compactação, como evidenciada pelo aumento da resistência à penetração, reduz a penetrabilidade de raízes no solo (Unger & Kaspar, 1994). É importante destacar que qualquer RP superior a 2 MPa pode reduzir o crescimento e desenvolvimento radicular (Oussible et al., 1992; Martino & Shaykewich, 1994; Ishaq et al., 2001). Desta forma, estima-se no presente estudo que a pressão de compactação limite (para não prejudicar o crescimento de raízes) é 540 kPa, na qual a RP foi 2,02 e 1,81 MPa, respectivamente, no LVA e LA.

Constatou-se que a RP apresentou correlação significativa ($p < 0,001$) e positiva com a densidade ($r = 0,91$ e $0,90$) e com a microporosidade ($r = 0,68$ e $0,87$); e negativa com a porosidade total ($r = -0,91$ e $-0,90$), com a macroporosidade ($r = -0,83$ e $-0,89$) e com a K_0 ($r = -0,74$ e $-0,69$, respectivamente, no LVA e LA). Estes resultados corroboram com os dados encontrados por Pagliai et al. (1992) e Marsili et al. (1998), que em experimentos de compactação do solo pelo trânsito de máquinas, também

obtiveram boa correlação negativa entre RP e macroporosidade na camada de 0-10 cm de profundidade. Beutler et al. (2001) também encontraram correlação significativa ($p < 0,05$) e negativa entre RP e K_0 ($r = -0,98$).

CONCLUSÕES

1. Solos caulíníticos são mais sensíveis à compactação do que solos oxídicos-gibbsíticos.
2. O incremento da microporosidade com a compactação aumentou a retenção de água no solo nas tensões de 0,01 e 1,5 MPa, tanto em base volumétrica como em base gravimétrica. No entanto, este aumento não se expressou em termos de conteúdo de água disponível no solo (ADS), exceção para θ_{grav} no LA, onde a redução da ADS foi de 48 %, após uma compactação de 900 kPa.
3. A condutividade hidráulica e a resistência à penetração foram as propriedades do solo que apresentaram maior sensibilidade aos efeitos da compactação, com maior potencial de uso para a avaliação da qualidade estrutural do solo.

LITERATURA CITADA

- ARSHAD, M.A.; LOWERY, B. & GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., eds. Methods for assessing soil quality. Madison, Soil Science Society of America. 1996. p. 123-141 (SSSA Special publication 49).
- BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURTI, N.; FERREIRA, M.M.; PEREIRA FILHO, I.A. & CRUZ, J.C. Agregação de Latossolo Vermelho distrófico típico relacionada com o manejo na região dos cerrados no Estado de Minas Gerais. R. Bras. Ci. Solo, 25:129-136, 2001.
- 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.
- BREMNER, J.M. & MULVANEY, C.S. Nitrogen – Total. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R., eds. Methods of soil analysis, 2.ed. Part 2. Madison: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1982. p.595-624.

- CERDÀ, A. Seasonal variability of infiltration rates under contrasting slope conditions in southeast Spain. *Geoderma*, 69:217-232, 1996.
- 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.
- DIAS JÚNIOR, M.S. & PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e a sua modelagem. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:175-182, 1996.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- GRANT, C.A. & LAFOND, G.P. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in southern Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.*, 73:223-232, 1993.
- GREACEN, E.L. & SANDS, R. Compaction of forests soil, a review. *Aust. J. Soil Res.*, 17:163-189, 1980.
- GUPTA, S.C. & ALLMARAS, R.R. Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.*, 6:65-100, 1987.
- ISHAQ, M.; IBRAHIM, M.; HASSAN, A.; SAEED, M. & LAL, R. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan: II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. *Soil Till. Res.*, 60:153-161, 2001.
- KAYOMBO, B. & LAL, R. Responses of tropical crops to soil compaction. In: SOANE, B.D. & VAN OUWERKERK, C., eds. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.287-316.
- KEMPER, W.D. & ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis. Part 1 – Physical and mineralogical methods*. SSSA book series, 2a ed., 1986. p.425-442.
- 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.
- MARSILI, A.; SERVADIO, P.; PAGLIAI, M. & VIGNOZZI, N. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber- and metal-tracked tractors. *Soil Till. Res.*, 49:185-199, 1998.
- MARTINO, D.L. & SHAYKEWICH, C.F. Root penetration profiles of wheat and barley as affected by soil penetration resistance in field conditions. *Can. J. Soil Sci.*, 74:193-200, 1994.

- McQUEEN, D.J. & SHEPHERD, T.G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endo-aquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. *Soil Till. Res.*, 63:93-107, 2002.
- 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.
- OLIVEIRA, C.V.; BAHIA, V.G. & PAULA, M.B. Compactação do solo devido à mecanização florestal: causas, efeitos e práticas de controle. *Inf. Agropec.*, 191:46-48, 1998.
- OUSSIBLE, M.; CROOKSTON, P.K. & LARSON, W.E. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat. *Agron. J.*, 84:34-38, 1992.
- PAGLIAI, M.; FEBO, P.; La MARCA, M. & LUCAMONTE, G. Effetti del compattamento provocato da differenti tipi di pneumatici su porosità e struttura del terreno. *Riv. Ingeg. Agr.*, 3:168-176, 1992.
- 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, M.L.N.; CURI, N. & BLANCANEUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 35:2485-2492, 2000.
- 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.
- UNGER, P.W. & KASPAR, T.C. Soil compaction and root growth: a review. *Agron. J.*, 86:759-766, 1994.
- WAGGER, M.G. & DENTON, H.P. Influence of cover crop and wheel traffic on soil physical properties in continuous no till corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53:1206-1210, 1989.
- YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 19:1467-1476, 1988.

EXPERIMENTO 2

FLUXO DIFUSIVO DE FÓSFORO, POTÁSSIO, ZINCO, COBRE, FERRO E MANGANÊS INFLUENCIADOS PELA COMPACTAÇÃO DE DOIS LATOSSOLOS

RESUMO

A compactação pode afetar o transporte de nutrientes no solo, em especial os de menor mobilidade. Este trabalho foi realizado sob condições controladas para avaliar os efeitos da compactação do solo sobre o fluxo difusivo de fósforo, potássio, zinco, cobre, ferro e manganês. Foram utilizados um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) oxídico-gibbsítico, e um Latossolo Amarelo (LA) caulinitico. O ensaio consistiu de oito tratamentos para cada solo, correspondendo a oito pressões de compactação. Os tratamentos, com cinco repetições, foram dispostos em delineamento em blocos casualizados. A unidade experimental foi composta por anel de PVC com 6 cm de altura e 4,55 cm de diâmetro interno, com volume útil de 97,6 cm³, que serviu de câmara de difusão. Amostras de solo foram adubadas com 200 mg dm⁻³ de P, 504 mg dm⁻³ de K, e 30 mg dm⁻³ de Zn, Cu, Fe e Mn. Calculou-se a quantidade de cada solo para ocupar o volume de 97,6 cm³ e atingir as densidades de 1,05 e 1,10 kg dm⁻³, respectivamente, no LVA e LA. A seguir as amostras de solo foram umedecidas (0,20 kg kg⁻¹ = 100 % do equivalente de umidade), acondicionadas nos vasos simultaneamente com lâminas de resinas iônicas e compactadas em uma prensa CBR equipada com anel dinamométrico. As pressões de compactação foram 0, 60, 120, 240, 360, 540, 720 e 900 kPa. Após a aplicação da pressão, determinou-se a densidade resultante por meio do novo volume ocupado pelo solo. Para a avaliação do fluxo difusivo dos nutrientes foram utilizadas lâminas de resina de troca aniônica e de troca catiônica, ambas com 10 cm² em cada lado, dispostas horizontalmente no solo antes da compactação, sendo a resina aniônica colocada na profundidade de 4 cm e a catiônica a 2 cm. Após a compactação, cada câmara de difusão foi envolvida por filme plástico. O ensaio de difusão foi conduzido por 20 dias em condições de laboratório, com temperatura controlada a 20 ± 2 °C. Decorrido esse tempo, as lâminas de resina foram retiradas da câmara e os elementos extraídos pela agitação de cada lâmina com 15 mL de uma solução de HCl

0,5 mol L⁻¹ durante uma hora. O P foi determinado por colorimetria; K por fotometria de chama; Zn, Cu, Fe e Mn por espectrofotometria de absorção atômica. A estimativa do fluxo difusivo de P (FDP), K (FDK), Zn (FDZn), Cu (FDCu), Fe (FDFe) e Mn (FDMn) foi realizada pela quantificação dos nutrientes transportados e adsorvidos às resinas. A compactação reduziu o FDP no LVA e, em geral, aumentou o FDK, Zn, Cu, Fe e Mn. O solo caulinitico apresentou maior difusão de Zn, Cu e Mn do que o solo oxidico-gibssitico. Para os micronutrientes, a ordem decrescente de fluxo difusivo foi: FDMn > FDZn >>> FDFe > FDCu. Os micronutrientes avaliados foram transportados na solução do solo em formas inorgânicas e, ou, como complexos orgânicos apresentando carga líquida positiva ou negativa, proporcionando resposta diferenciada do fluxo difusivo à compactação, tanto na resina catiônica como na aniônica.

Termos para indexação: Difusão de nutrientes, densidade do solo, resina de troca iônica.

SUMMARY: Diffusive flux of phosphorus, zinc, copper, iron and manganese of two Latosols, as affected by soil compaction.

Soil compaction can affect the transport of nutrients in the soil, specially of those with low mobility. An experiment was carried out under controlled conditions in order to evaluate the effects of soil compaction on the diffusive flux of P, K, Zn, Cu, Fe and Mn. An oxidic-gibbsitic Red Yellow Latosol (LVA) and a caulinitic Yellow Latosol (LA) were used. The experiment consisted of eight treatments in each soil, corresponding to eighth levels of pressure for compaction. The treatments, with five replicates, were disposed in a randomized block design. The experimental unit was composed by a PVC pipe (6 cm in height and 4.55 cm of internal diameter), with an effective volume of 97,6 cm³, which was used as a diffusion chamber. Rates of 200 mg dm⁻³ of P, 504 mg dm⁻³ of K, 30 mg dm⁻³ of Zn, Cu, Fe e Mn were added to the soils. A quantity of soil was calculated to occupy 97.6 cm³ and reach the bulk density of 1.05 and 1.10 kg dm⁻³, respectively in LVA and LA. Subsequently the samples of soils were moistened to field capacity (0.20 kg kg⁻¹), placed in pots made of PVC pipe concurrent with the ionics resins. The compaction of the soils in the PVC pipes was obtained with a CBR press. The applied pressures were 0, 60, 120, 240, 360, 540, 720 e 900 kPa. After soil compaction, the resulting bulk density was calculated according to the new volume occupied by the soil. For

the evaluation of nutrient diffusive flux, films of anionic and cationic resins, both with 10 cm² in each side, were disposed horizontally on the soil before the compaction, and the anionic and cationic resins placed at 4 and 2 cm depth, respectively. The diffusion chamber was involved in a plastic film after soil compaction. The diffusion experiment was carried out for 20 days in the laboratory, under controlled temperature at 20 ± 2 °C. After this period, the resin strips were removed from the chamber and the adsorbed elements were extracted by 15 mL of a 0.5 mol L⁻¹ HCl solution shaking for 1 hour. The P level was determined colorimetrically, K by flame photometry, Zn, Cu, Fe and Mn by atomic absorption spectroscopy. The estimative of the diffusive fluxes of P (PDF), K (KDF), Zn (ZnDF), Fe (FeDF), Cu (CuDF), Mn (MnDF) was obtained by the quantification of the nutrients adsorbed on the resin strips. Soil compaction decreased the PDF in LVA and, in general, increased DF of K, Zn, Cu, Fe and Mn. The diffusive fluxes of Zn, Cu and Mn were higher in caulinitic soil with regard to oxidic-gibbsitic soil. The diffusive flux order to micronutrients were: MnDF > ZnDF >>> FeDF > CuDF. The transport of micronutrients were by diffusive flux in inorganic forms and organic compounds with positive or negative net electric charge, which provide different response to soil compaction in both, cationic and anionic resins.

Index terms: Diffusion of nutrients, soil bulk density, ionic-exchange resin.

INTRODUÇÃO

Um dos problemas no manejo do maquinário agrícola é decidir quando as operações mecanizadas devem ser realizadas de forma a não impactar o solo. A aplicação de determinada pressão ao solo, sem o prévio conhecimento de sua capacidade de suporte, pode levar ao emprego de uma pressão que exceda essa capacidade, resultando em compactação adicional do solo (Dias Júnior & Pierce, 1996; Dias Júnior, 2000).

A compactação pode reduzir o crescimento de plantas por seu efeito adverso sobre o crescimento de raízes e conseqüente redução na absorção de água e de nutrientes (Nadian et al., 1996; Ishaq et al., 2001; Silva et al., 2002). Além disso, a compactação pode interferir na movimentação de água e de nutrientes no solo, reduzindo a disponibilidade dos mesmos para as plantas. 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 alguns nutrientes (Costa, 1998; Novais & Smyth, 1999). Portanto, pode-se antecipar que em solos compactados a produtividade agrícola ou florestal pode ser comprometida temporariamente ou de maneira permanente.

O fluxo difusivo (FD) é o processo de maior importância para o transporte de P, K, Zn, Cu, Fe e Mn, dada a baixa concentração desses nutrientes no solo e à grande afinidade com a fase sólida do solo, dentre outros fatores (Barber, 1995; Marschner, 1995; Novais & Smyth, 1999; Oliveira et al., 1999). O FD de nutrientes é uma função da densidade do solo, característica diretamente relacionada com a compactação. Novais & Smyth (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.

O fluxo difusivo de um nutriente em solos é expresso pela Lei de Fick (Nye & Tinker, 1977; Barber, 1995; Novais & Smyth, 1999):

$$F = - DA (\delta c / \delta x) \quad (1)$$

em que D é o coeficiente de difusão do elemento, em $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$; F é o fluxo difusivo do elemento, em mol s^{-1} , através de uma superfície de área A, em cm^2 , causado pelo decréscimo de sua concentração (δc), em mol cm^{-3} , com o aumento da distância de transporte (δx), em cm; sendo $\delta c / \delta x$ o gradiente de concentração ao longo da trajetória de transporte do nutriente; o sinal negativo da equação advém do decréscimo do δc com o aumento de δx . O coeficiente de difusão é estimado pela equação:

$$D = D_i \theta f (\delta I / \delta Q) \quad (2)$$

em que D_i é o coeficiente de difusão do elemento em água, constante para cada elemento, em $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$; θ é o conteúdo de água no solo, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; f é o fator de impedância, adimensional, e $\delta I / \delta Q$ é a variação do fator intensidade (I) do elemento na solução do solo em relação ao fator quantidade (Q) do elemento na forma trocável ou lábil, em equilíbrio com I. O valor $\delta I / \delta Q$ é o inverso do fator capacidade (poder tampão) do elemento no solo.

A difusão pode ser avaliada por meio de técnicas que simulem a absorção de nutrientes pela planta. Isso é possível pela utilização de resinas de troca iônica em contato com o solo (Costa, 1998; Oliveira et al., 1999; Oliveira

et al., 2000; Pegoraro, 2003; Nunes et al., 2004). Essas resinas servem de dreno para os nutrientes da solução do solo, gerando um gradiente de concentração e, portanto, simulam a presença de uma raiz.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da compactação do solo sobre a difusão de P, K, Zn, Cu, Fe e Mn em dois Latossolos.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados dois solos com mineralogia distinta, um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) oxídico-gibbsítico e um Latossolo Amarelo (LA) caulinitico. Os solos foram coletados em povoamentos de eucalipto, na profundidade de 0-15 cm, secos ao ar, passados em peneira de 4 mm de malha e homogeneizados, para posterior análise química e física (Quadro 1).

O ensaio consistiu de oito tratamentos para cada solo, correspondendo a oito níveis de pressão de compactação. Os tratamentos, com cinco repetições, foram dispostos em delineamento em blocos casualizados. A unidade experimental foi composta por anel de PVC com 6 cm de altura e 4,55 cm de diâmetro interno, com volume útil de 97,6 cm³, que serviu de câmara de difusão.

Amostras de solo foram adubadas com 200 mg dm⁻³ de P, 504 mg dm⁻³ de K, e 30 mg dm⁻³ de Zn, Cu, Fe e Mn. Os nutrientes foram aplicados via solução, utilizando-se K₂HPO₄ como fonte de P e K, e sulfatos como fonte de Zn, Cu, Fe e Mn (ZnSO₄.7H₂O; CuSO₄.5H₂O; FeSO₄.7H₂O; MnSO₄.H₂O). Calculou-se a quantidade de cada solo para ocupar o volume de 97,6 cm³ e atingir as densidades de 1,05 e 1,10 kg dm⁻³, respectivamente, no LVA e LA. A seguir as amostras de solo foram umedecidas (0,20 kg kg⁻¹ = 100 % do equivalente de umidade), acondicionadas nos vasos juntamente com as lâminas de resinas iônicas e compactadas em uma prensa CBR equipada com anel dinamométrico. As pressões de compactação foram 0, 60, 120, 240, 360, 540, 720 e 900 kPa. Foi calculada a densidade do solo resultante da compactação, por meio do novo volume ocupado por ele.

Para a avaliação do fluxo difusivo dos nutrientes foram utilizadas lâminas de resina de troca aniônica tipo base forte (IONICS 204UZRA) e de troca catiônica tipo ácido forte (IONICS CR 61-CZR-442), pré-condicionadas e saturadas com uma solução de NaHCO₃ 1 mol L⁻¹, conforme Rajj & Quaggio

(1983). As lâminas, com área de 10 cm² (4 x 2,5 cm) em cada lado, foram dispostas horizontalmente no solo antes da compactação, sendo a resina aniônica colocada na profundidade de 4 cm e a catiônica a 2 cm. Após a compactação as extremidades dos vasos de PVC foram fechadas com lâminas rígidas de papelão plastificado fixadas com fita adesiva de polietileno. A seguir cada câmara de difusão foi envolvida por filme plástico para evitar a perda de umidade.

Quadro 1. Caracterização dos solos utilizados no experimento

Característica	LVA	LA
COT (dag kg ⁻¹) ⁽¹⁾	2,76	2,20
N-total (dag kg ⁻¹) ⁽²⁾	0,15	0,13
P (mg dm ⁻³) ⁽³⁾	0,78	5,14
K (mg dm ⁻³) ⁽³⁾	24	29
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽⁴⁾	0,18	1,02
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽⁴⁾	0,07	0,15
Zn (mg dm ⁻³) ⁽³⁾	1,40	2,77
Fe (mg dm ⁻³) ⁽³⁾	37,50	46,67
Mn (mg dm ⁻³) ⁽³⁾	1,50	8,00
Cu (mg dm ⁻³) ⁽³⁾	0,56	0,66
pH ⁽⁵⁾	4,5	4,8
Equivalente de umidade (kg kg ⁻¹)	0,2	0,2
Densidade do solo (kg dm ⁻³)	1,05	1,10
Argila (g kg ⁻¹)	470	510
Silte (g kg ⁻¹)	90	40
Areia (g kg ⁻¹)	440	450
Classe textural	Argila	Argila
SiO ₂ (g kg ⁻¹) ⁽⁶⁾	71,29	135,19
Al ₂ O ₃ (g kg ⁻¹) ⁽⁶⁾	172,93	139,99
Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹) ⁽⁶⁾	60,64	44,64
Classe mineralógica	Oxídico-gibbsítico	Caulinítico
P _{REM} (mg L ⁻¹) ⁽⁷⁾	14,0	24,5

⁽¹⁾ Carbono orgânico total (Yeomans & Bremner, 1988); ⁽²⁾ Nitrogênio total (Bremner & Mulvaney, 1982); ⁽³⁾ Extrator Mehlich-1 (Mehlich, 1978); ⁽⁴⁾ Extrator KCl 1 mol L⁻¹; ⁽⁵⁾ pH em água, relação 1:2,5; ⁽⁶⁾ Elementos no extrato do ataque sulfúrico (EMBRAPA, 1997); ⁽⁷⁾ Fósforo remanescente (Alvarez V. et al., 2000)

O ensaio de difusão foi conduzido por 20 dias em laboratório, com temperatura controlada a 20 ± 2 °C. Decorrido esse tempo de incubação, cada lâmina de resina foi retirada da câmara de difusão e agitada em frascos plásticos com 20 mL de água deionizada por 10 minutos para remoção de partículas de solo aderido. Em seguida, o excesso de água foi removido com papel de filtro. A dessorção dos elementos das resinas foi realizada pela agitação de cada lâmina com 15 mL de uma solução de HCl $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ durante uma hora (Raij & Quaggio, 1983). O P foi determinado por colorimetria (Braga & Defelipo, 1974), sendo o pH do extrato previamente corrigido para 5,5, utilizando-se solução de NaOH 10 mol L^{-1} e indicador *p*-nitrofenol; K por fotometria de chama; e Zn, Cu, Fe e Mn por espectrofotometria de absorção atômica. A estimativa do fluxo difusivo de P (FDP), K (FDK), Zn (FDZn), Cu (FDCu), Fe (FDFe) e Mn (FDMn) foi realizada pela quantificação dos nutrientes adsorvidos às resinas por unidade de área e tempo.

Os resultados foram submetidos, individualmente para cada solo, à análise de variância e de regressão. Ajustaram-se os modelos de regressão linear, quadrático e quadrático base raiz quadrada. Para a escolha dos modelos, os coeficientes da equação foram testados com base no quadrado médio do resíduo da ANOVA do experimento. Finalmente, para dois ou mais modelos com coeficientes significativos, a seleção baseou-se no maior coeficiente de determinação (R^2).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve aumento da densidade do solo (D_s) em resposta às pressões de compactação (Figura 1). Este aumento atingiu 29,5 e 35,1 %, respectivamente, no LVA e LA, nos solos compactados com maior pressão (900 kPa).

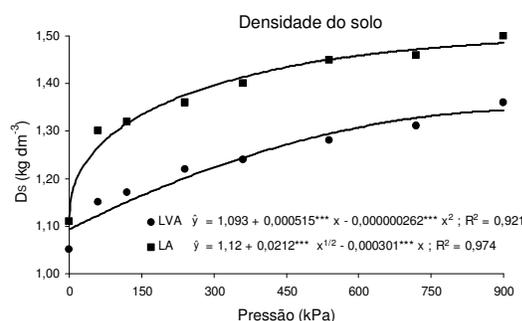


Figura 1. Densidade dos Latossolos compactados com diferentes pressões.

O fluxo difusivo de fósforo (FDP) foi reduzido pela compactação do solo no LVA (Figura 2). Esta redução foi em média de 83 % em relação à testemunha não compactada (0 kPa). Novais & Smyth (1999) levantam 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. O FDP aqui apresentado refere-se ao P adsorvido à resina aniônica, uma vez que na catiônica não foi registrada adsorção deste elemento, pois na faixa de pH dos solos usados neste experimento o P encontra-se na solução do solo em formas aniônicas (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}).

No LA não houve efeito da compactação sobre o FDP, o que pode ser atribuído à elevada fixação de P ao solo, mesmo na testemunha não compactada, o que fica evidente em vista dos baixos valores de FDP em todos os tratamentos. Esta maior fixação de P no solo caulinitico (LA) não era esperada, pois solos oxídicos, como o LVA, apresentam maior capacidade de adsorção de fosfato em relação a solos cauliniticos. Uma explicação plausível é a provável ocorrência de capeamento da caulinita pela precipitação de óxidos de Fe na sua superfície. Portanto, a distribuição dos óxidos de Fe na matriz do solo também é importante com relação à capacidade de fixação de P.

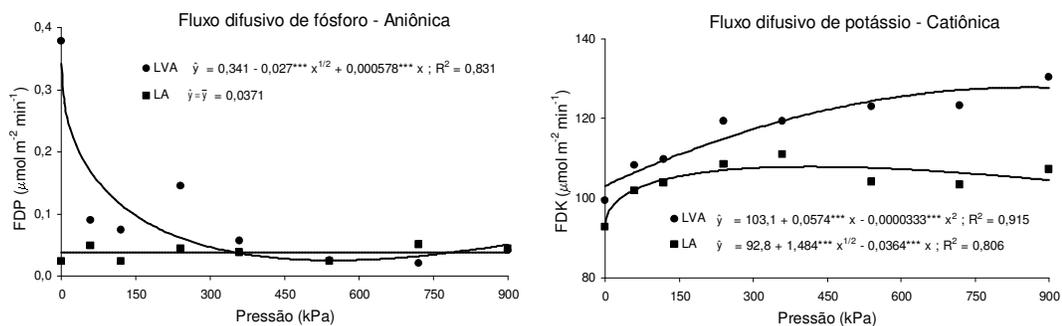


Figura 2. Fluxo difusivo de P e K em dois Latossolos compactados com diferentes pressões.

A compactação do solo proporcionou aumento do fluxo difusivo de potássio (FDK), zinco (FDZn), cobre (FDCu), ferro (FDFe) e manganês (FDMn) em metade das vezes (Figuras 2 e 3). O aumento do fluxo difusivo destes nutrientes pode ser atribuído ao aumento da densidade do solo com o aumento da pressão (Figura 1).

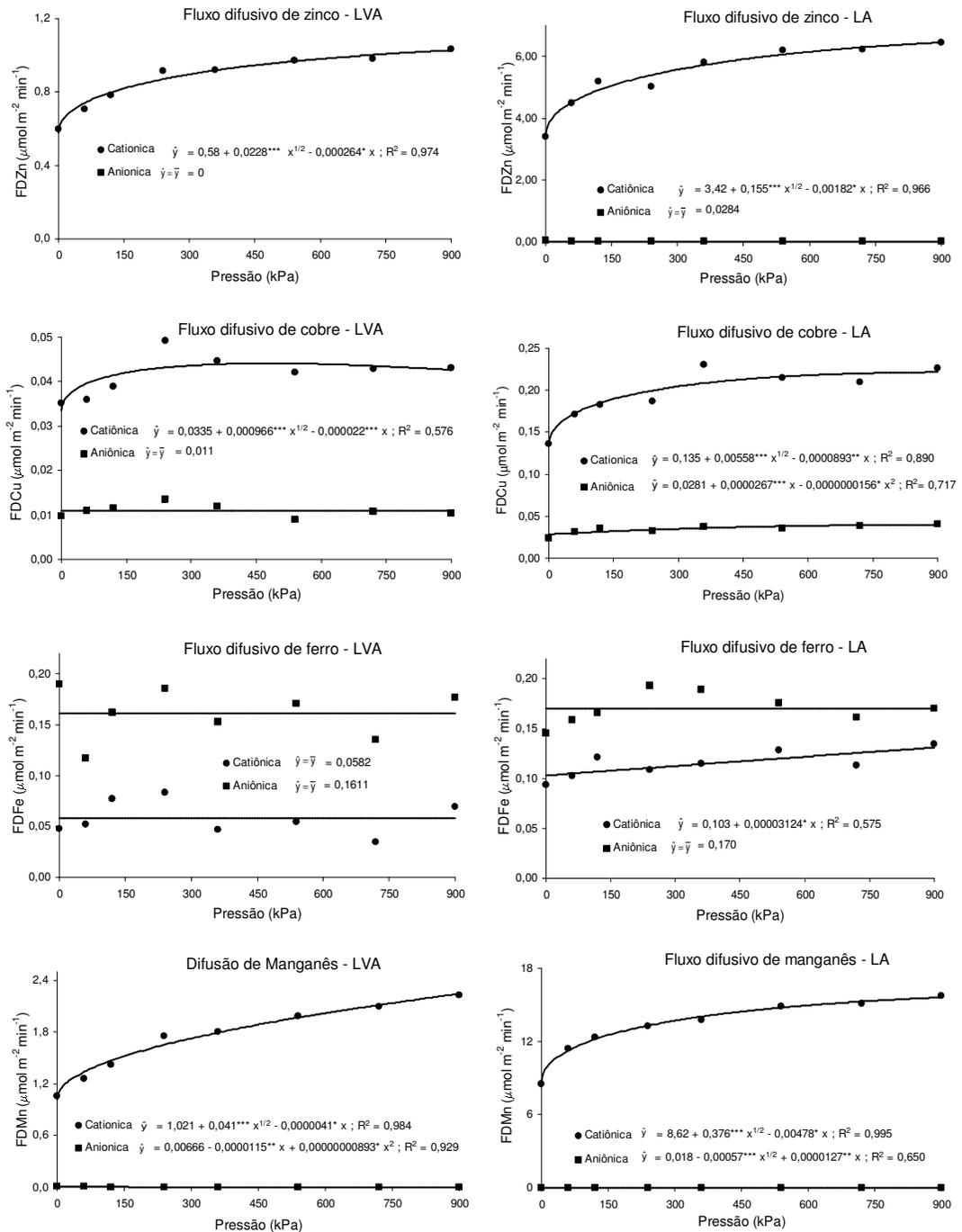


Figura 3. Fluxo difusivo de Zn, Cu, Fe e Mn em dois Latossolos compactados com diferentes pressões.

Segundo Oliveira et al. (1998), 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 a superfície das raízes, o que favorece a continuidade do filme de água e diminui a

distância que o íon deve percorrer até alcançar as raízes da planta ou a membrana de resina iônica utilizada neste estudo.

As alterações na difusão de um íon quando um solo é submetido à compactação, aumentando-se a densidade, são atribuídas a mudanças no fator de impedância, que envolve a tortuosidade (Costa, 1998). Warncke & Barber (1971) observaram que a tortuosidade foi reduzida com o aumento da densidade do solo, ocorrendo redução do comprimento do caminho de difusão do elemento. Outro fator que contribuiu para o aumento do FD nos solos compactados é o fato de a compactação aumentar o conteúdo volumétrico de água no solo, como verificado no experimento 1 por Silva (2005), uma vez que a umidade influencia a partição de íons entre as fases líquida e sólida, aumentando-a, e assim, aumentando $\delta l/\delta Q$ e, conseqüentemente, o valor de D (Eq. 2).

O aumento do FDK (Figura 2) atingiu 31,2 e 19,7 %, respectivamente, no LVA (pressão = 900 kPa) e LA (pressão = 360 kPa). O FDK refere-se ao K adsorvido à resina catiônica, uma vez que na aniônica não foi registrada adsorção deste elemento, ou seja, o K encontra-se na solução do solo apenas na forma catiônica (K^+).

Houve difusão de Zn, Cu, Fe e Mn para as resinas catiônica e aniônica (exceção para Zn no LVA) (Figura 3). Apesar destes micronutrientes serem encontrados na solução do solo como formas inorgânicas catiônicas (Zn^{2+} , $ZnOH^+$; Cu^{2+} , $Cu(OH)^{2+}$, $CuOH^+$; Fe^{3+} , Fe^{2+} , $FeOH^{2+}$, $Fe(OH)_2^+$; Mn^{2+} , Mn^{3+} , Mn^{4+} , $Mn(OH)^+$, $MnCl^+$) (Lindsay, 1972; Camargo, 1988; Ferreira & Cruz, 1991; Marschner, 1995), eles podem formar complexos solúveis em água, principalmente com ácidos orgânicos (Stevenson & Ardakani, 1972; Camargo, 1988; Pegoraro, 2003), os quais podem apresentar carga líquida negativa e serem adsorvidos em resinas aniônicas. O fenômeno da quelação dos metais no solo é muito importante porque ele aumenta a solubilidade desses metais, aumentando, conseqüentemente, sua mobilidade tanto por difusão como por fluxo de massa (Camargo, 1988). Complexos organo-metálicos constituem, freqüentemente, a principal forma de micronutrientes na solução do solo e ajudam no seu transporte para as raízes (Duxbuty, 1989; Jones & Darrah, 1994).

O aumento do FDZn para a resina catiônica atingiu 74 e 89 %, respectivamente, no LVA e LA, na pressão de 900 kPa. No entanto, o FDZn foi

nulo (LVA) ou insignificante (LA) quando avaliado por meio da resina aniônica. Isto demonstra que as formas catiônicas de zinco, sejam inorgânicas ou orgânicas (complexos e, ou, quelatos), são difundidas em maior quantidade para as resinas, como verificado por Pegoraro (2003).

Em resposta à compactação houve aumento do FDCu para a resina catiônica de 22 % no LVA e de 66 e 70 % no LA, respectivamente, para as resinas catiônica e aniônica, na pressão de 900 kPa. Verifica-se que as formas catiônicas de cobre (inorgânicas ou orgânicas) difundiram-se em maior quantidade para as resinas, uma vez que o FDCu para a resina catiônica foi em média 3,8 e 5,7 vezes maior, respectivamente, no LVA e LA, em relação à resina aniônica.

O aumento do FDFe para a resina catiônica, em resposta à compactação, foi de 17 % no LA, na pressão de 900 kPa. Para as demais situações não houve diferença significativa entre os tratamentos. Verifica-se, de modo inverso aos demais cátions avaliados, que as formas aniônicas de ferro difundiram-se preferencialmente para as resinas, uma vez que o FDFe mensurado na resina aniônica foi, em média, 2,8 e 1,5 vezes maior do que na resina catiônica, respectivamente, no LVA e LA. Resultados similares foram obtidos por Pegoraro (2003) que também obteve maior FDFe para a resina aniônica em dois solos, um argiloso (LVdf) e outro de textura média (LVAd).

O maior nível de compactação (900 kPa) ocasionou aumento do FDMn mensurado na resina catiônica de 111 e 85 %, e decréscimo de 54 e 24 % na resina aniônica, respectivamente, no LVA e LA. Verifica-se que as formas catiônicas de Mn (inorgânicas ou orgânicas) difundiram-se preferencialmente para as resinas, uma vez que o FDMn medido na resina catiônica foi, em média, 379 e 993 vezes maior do que aquele mensurado na resina aniônica, respectivamente, no LVA e LA. Pegoraro (2003) também obteve maior FDMn para a resina catiônica.

Observa-se que o FD de Zn, Cu e Mn foram bem maiores no LA em relação ao LVA. Isto pode ser atribuído ao fato de o LVA apresentar maior teor de matéria orgânica e ser oxidico, com elevada capacidade de adsorção de metais (menor $\delta I/\delta Q$ – Eq. 2). Portanto, mesmo os dois solos apresentando textura semelhante, verifica-se que a mineralogia dos solos é fator determinante sobre a difusão de nutrientes.

O Mn e o Zn foram os micronutrientes que apresentaram maior fluxo difusivo, provavelmente devido a menor retenção pelo solo. O Cu apresentou o menor fluxo difusivo, uma vez que é o micronutriente que tem maior afinidade com a matéria orgânica (Temminghoff et al., 1997), e não pode ser facilmente extraído do solo dada a sua forte ligação com os argilominerais.

CONCLUSÕES

1. A compactação pode reduzir o FDP e aumentar o FDK, Zn, Cu, Fe e Mn.
2. Solo caulinitico apresenta maior difusão de Zn, Cu e Mn do que solo oxidico-gibbsitico.
3. A ordem decrescente de fluxo difusivo para os micronutrientes foi: $FDMn > FDZn \gg FDFe > FDCu$.
4. Os micronutrientes avaliados foram transportados na solução do solo em formas inorgânicas e, ou, como complexos orgânicos apresentando carga líquida positiva ou negativa, proporcionando resposta diferenciada do fluxo difusivo à compactação, tanto na resina catiônica como na aniônica.

LITERATURA CITADA

- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E. & OLIVEIRA, J.A. Determinação e uso do fósforo remanescente. B. Inf. SBCS, 25:27-32, 2000.
- BARBER, S.A. Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, 1995. 414p.
- BRAGA, J.M. & DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de P em extratos de solo e material vegetal. R. Ceres, 21:73-85, 1974.
- BREMNER, J.M. & MULVANEY, C.S. Nitrogen – Total. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R., eds. Methods of soil analysis, 2.ed. Part 2. Madison: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1982. p.595-624.
- CAMARGO, O.A. Micronutrientes no solo. In: XVII Reunião Brasileira de Fertilidade do solo. Enxofre e micronutrientes na agricultura brasileira. Londrina, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1988. p.103-120.
- COSTA, J.P.V. Fluxo difusivo de fósforo e de potássio em Latossolos. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1998. 67p. (Tese de Doutorado)

- DIAS JÚNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & 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 a sua modelagem. R. Bras. Ci. Solo, 20:175-182, 1996.
- DUXBURY, J.M.; SMITH, M.S.; DORAN, J.W; JORDAM, C.; SZOTT, L. & VANCE, E. Soil organic matter as a source and a sink of plant nutrient. In: COLEMAN, D.C.; OADES, J.M. & UEHARA, G. eds. Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. University of Hawaii, USA, 1989. p.33-67.
- FERREIRA, E.F. & CRUZ, M.C.P. Micronutrientes na agricultura. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1991. 734p.
- ISHAQ, M.; IBRAHIM, M.; HASSAN, A.; SAEED, M. & LAL, R. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan: II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. Soil Till. Res., 60:153-161, 2001.
- JONES, D.L. & DARRAH, R. Role of root derived organic acids in mobilization of nutrients from the rhizosphere. Plant Soil, 166:247-257, 1994.
- LINDSAY, W.L. Inorganic phase equilibria of micronutrients in soils. In: MORTVEDT, J.J.; GIORDANO, P.M. & LINDSAY, W.L. eds. Micronutrients in agriculture, Madison, Soil Science Society of America, 1972. p. 41-78.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 2.ed. San Diego, Academic Press, 1995. 889p.
- MEHLICH, A. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 9:477-492, 1978.
- 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 colonization. Plant Soil, 182: 39-49, 1996.
- NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.
- NUNES, F.N.; NOVAIS, R.F.; SILVA, I.R.; GEBRIM, F.O. & SÃO JOSÉ, J.F.B. Fluxo difusivo de ferro em solos sob influência de doses de fósforo e de níveis de acidez e umidade. R. Bras. Ci. Solo, 28:423-429, 2004.
- NYE, P.H. & TINKER, P.B. Solute movement in the soil-root system. Berkeley, University of California Press, 1977. 342p.

- OLIVEIRA, C.V.; BAHIA, V.G. & PAULA, M.B. Compactação do solo devido à mecanização florestal: causas, efeitos e práticas de controle. *Inf. Agropec.*, 191:46-48, 1998.
- OLIVEIRA, M.F.G.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; ALVES, V.M.C. & VASCONCELLOS, C.A. Fluxo difusivo de zinco em amostras de solo influenciado por textura, íon acompanhante e pH do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:609-615, 1999.
- OLIVEIRA, F.H.; NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. & NEVES, J.C. Aluminum diffusion in Oxisols as influenced by soil water matric potential, pH, lime, gypsum, potassium chloride, and calcium phosphate. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 31: 2523-2533, 2000.
- PEGORARO, R.F. Fluxo difusivo de micronutrientes catiônicos em resposta a adição de compostos orgânicos ao solo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2003. 68p. (Tese de Mestrado)
- RAIJ, B. van & QUAGGIO, J.A. Métodos de análise de solo para fins de fertilidade (Boletim técnico, 81). Campinas, 1983. 31p.
- SILVA, S.R.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. & PEREIRA, P.R.G. Eficiência nutricional de potássio e crescimento de eucalipto influenciados pela compactação do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:1001-1010, 2002.
- SILVA, S.R. Efeitos da compactação sobre características físicas, químicas e microbiológicas de dois Latossolos e no crescimento de eucalipto. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2005. 98p. (Tese de Doutorado)
- STEVENSON, F.J. & ARDAKANI, M.S. Organic-matter reactions involving micronutrients in soils. In: MORTVEDT, J.J.; GIORDANO, P.M. & LINDSAY, W.L. *Micronutrients in agriculture*. Madison, Soil Science Society of America, 1972. p.79-114.
- TEMMINGHOFF, E.J.M.; VAN DER ZEE, S.E.A.T.M. & DE HAAN, F.A.M. Copper mobility in a copper-contaminated sandy soil as affected by pH and solid and dissolved organic matter. *Environ. Sci. Technol.*, 31:1109-1115, 1997.
- 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.
- YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 19:1467-1476, 1988.

EXPERIMENTO 3

ATIVIDADE MICROBIANA E TRANSFORMAÇÕES DO CARBONO E NITROGÊNIO AFETADAS PELA COMPACTAÇÃO DO SOLO

RESUMO

A mecanização em atividades agrícolas e florestais tem incrementado a compactação do solo, que resulta no aumento da densidade e microporosidade, e na redução da condutividade hidráulica e das taxas de difusão de O_2 e CO_2 , alterando, assim, a atividade dos microrganismos do solo e os processos envolvidos na decomposição da matéria orgânica e disponibilidade de nutrientes. Este trabalho foi realizado sob condições controladas para avaliar os efeitos da compactação sobre a atividade microbiana e mineralização do carbono (C) e nitrogênio (N) do solo. Foram utilizados um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) oxídico-gibbsítico, e um Latossolo Amarelo (LA) caulínítico. O ensaio consistiu de oito tratamentos para cada solo, correspondendo a oito pressões de compactação. Os tratamentos, com seis repetições, foram dispostos em delineamento em blocos casualizados. A unidade experimental foi composta por anel de PVC com 6 cm de altura e 4,55 cm de diâmetro interno, com volume útil de $97,6 \text{ cm}^3$. Calculou-se a quantidade de cada solo para ocupar o volume de $97,6 \text{ cm}^3$ e atingir as densidades de $1,05$ e $1,10 \text{ kg dm}^{-3}$, respectivamente, no LVA e LA. A seguir as amostras de solo foram umedecidas ($0,20 \text{ kg kg}^{-1} = 100\%$ do equivalente de umidade), acondicionadas nos tubos de PVC e compactadas em uma prensa CBR equipada com anel dinamométrico. As pressões de compactação foram 0, 60, 120, 240, 360, 540, 720 e 900 kPa. Após a aplicação da pressão, determinou-se a densidade resultante por meio do novo volume ocupado pelo solo. Em seguida, cada vaso foi individualmente disposto no interior de um pote plástico de 1 L, que foi hermeticamente fechado. Procedeu-se a uma incubação aeróbica dos solos por um período de 35 dias. Foi avaliada a respiração basal (C- CO_2 mineralizado), nas duas últimas semanas. Concluída a incubação, foram realizadas análises químicas e microbiológicas em amostras dos solos: C da biomassa microbiana (C_{MIC}), C orgânico total (COT), N total, N- NH_4^+ e N- NO_3^- do solo. Foram calculados o N mineral, N orgânico e a taxa de

mineralização líquida de N. A compactação ocasionou aumento do N-NH_4^+ e da taxa de mineralização líquida de N nos dois solos e do N-NO_3^- no LVA; decréscimo da taxa de perda de COT nos dois solos, de N-NO_3^- no LA, de C-CO_2 no LVA e de C_{MIC} no LA em maiores pressões. Conclui-se que a compactação do solo diminui a ciclagem de COT devido ao aumento da proteção física da matéria orgânica e à menor atividade microbiana aeróbica; e que pressões superiores a 540 kPa intensificam a formação de ambiente anaeróbico que promove perdas de N por denitrificação.

Termos para indexação: Densidade do solo, mineralização de carbono e nitrogênio, carbono da biomassa microbiana, nitrato, amônio, denitrificação.

SUMMARY: Microbial activity and carbon and nitrogen transformations as affected by soil compaction

The soil compaction deriving from mechanical activity in agriculture has increased the soil bulk density and water-filled porosity and decreased the hydraulic conductivity and diffusion of O_2 e CO_2 , which disturb the soil microbial activity, soil organic matter decomposition and nutrient availability. An experiment was carried out under controlled conditions in order to evaluate the effects of soil compaction on microbial activity and soil mineralization of carbon and nitrogen. An oxidic-gibbsitic Red Yellow Latosol (LVA), and a caulinitic Yellow Latosol (LA), were used. The experiment consisted of eight treatments in each soil, corresponding to eight levels of pressure for compaction. The treatments, with six replicates, were disposed in a randomized block design. The experimental unit was composed by a PVC pipe (6 cm in height and 4.55 cm of internal diameter), with an effective volume of $97,6 \text{ cm}^3$. A quantity of soil was calculated to occupy 97.6 cm^3 and reach the bulk density of 1.05 and 1.10 kg dm^{-3} , respectively in LVA and LA. Subsequently the samples of soils were moistened (field capacity: 0.20 kg kg^{-1}), placed in pots of PVC pipe and compacted with a CBR press. The pressure of compaction were 0, 60, 120, 240, 360, 540, 720 e 900 kPa. After soil compaction, the bulk density was calculated according to the new volume occupied by the soil. Subsequently each PVC pipes were disposed inside the plastic vessel of 1 L, which was hermetic closed. An aerobic incubation of soil was accomplished for 35 days. The basal respiration rate (C-CO_2 production) was estimate in the last two

weeks. After the incubation, chemical and microbiological analysis were performed: microbial biomass C (C_{MIC}), soil organic C (SOC), total N, $N-NH_4^+$ and $N-NO_3^-$ of the soil. Subsequently, were calculated the mineral N, organic N and net nitrogen mineralization. The soil compaction increased $N-NH_4^+$ and net nitrogen mineralization in both, LVA and LA, and $N-NO_3^-$ in the LVA; decreased loss SOC rate in both, LVA and LA, $N-NO_3^-$ in the LA, $C-CO_2$ in the LVA, and C_{MIC} in greater levels of pressure in the LA. It follows that soil compaction decrease the SOC turnover due to increase of physical protection of soil organic matter and to decrease aerobic microbial activity; pressure higher to 540 kPa to enhance the anaerobic conditions and N losses due denitrification.

Index terms: Soil bulk density, carbon mineralization, nitrogen mineralization, microbial biomass carbon, nitrate, ammonium, denitrification.

INTRODUÇÃO

A intensificação das operações silviculturais mecanizadas e de colheita no setor florestal tem promovido um aumento substancial da compactação do solo e isso pode comprometer a produtividade dos plantios em rotações futuras (Wert & Thomas, 1981; Balbuena et al., 2000; Startsev & McNabb, 2000). Efeitos negativos da compactação sobre o crescimento de plantas têm sido atribuídos primariamente à restrição ao crescimento radicular. No entanto, tem sido sugerido que a compactação do solo pode afetar o tamanho, diversidade e a atividade da biomassa microbiana e, portanto, resultar em mudanças nos padrões de ciclagem de nutrientes necessários para o crescimento de plantas (Dick et al., 1988; Jensen et al., 1996a,b; Lee et al., 1996).

A compactação desempenha um importante papel no controle da atividade microbiana do solo, uma vez que o aumento da densidade do solo promove alteração da porosidade, redução da taxa de difusão de O_2 e CO_2 , aumento de microsítios anaeróbicos e redução da atividade microbiana aeróbica (Torbert & Wood, 1992; Jensen et al., 1996a). Esses efeitos adversos da compactação do solo sobre a atividade microbiana resultam principalmente das perdas de continuidade de bioporos e outros macroporos (Whalley et al., 1995). Estudos têm indicado que baixa concentração de O_2 (< 2-5 %) (Parr & Reuszer, 1962) e baixa macroporosidade (< 10 %) (Lin & Doran, 1984) causam decréscimo da atividade microbiana aeróbica no solo e, possivelmente,

umentam as taxas de denitrificação (Breland & Hansen, 1996; Jensen et al., 1996a). Nesse sentido, a respiração do solo (produção de CO₂) serve como uma medida da taxa de decomposição da matéria orgânica (Hassink, 1994; Lee et al., 1996). Outra vantagem de se medir a evolução de CO₂ ao invés da absorção de O₂, está no fato do CO₂ emitido refletir a atividade tanto de microrganismos aeróbicos quanto de anaeróbicos.

A compactação do solo pode afetar a ciclagem de C e N pela mudança da aeração do solo e, ou, da estrutura da comunidade microbiana, sendo que poucos estudos foram realizados até então para quantificar os efeitos da compactação do solo sobre a ciclagem da matéria orgânica, biomassa e atividade microbianas, incluindo respiração e mineralização de N (Jensen et al., 1996b). Em um dos poucos estudos de campo sobre os impactos da compactação sobre as transformações de C e N do solo, Dick et al. (1988) encontraram que o C da biomassa microbiana (C_{MIC}) decresceu 38 % na camada de 10-20 cm de profundidade em solo compactado sob trilha de trator, quando comparado ao tratamento controle, sendo que o C_{MIC} teve correlação significativa e negativa com a densidade do solo nesse trabalho.

Mudanças na atividade microbiana e na taxa de denitrificação em solos afetados por variação do espaço poroso pela umidade têm sido extensivamente estudadas (Craswell & Martin, 1974; Myers et al., 1982; Linn & Doran, 1984). Entretanto, poucos estudos têm examinado os efeitos de mudanças em condições físicas do solo sobre as transformações do N. Em particular, há escassez de informação a respeito dos efeitos da compactação sobre a atividade microbiana e transformações de N. Linn & Doran (1984) conduziram um estudo de laboratório e verificaram que a atividade microbiana decresceu muito pouco com a compactação do solo. Por sua vez, Jensen et al. (1996b) verificaram que nenhuma medida de biomassa microbiana foi significativamente afetada pela variação da porosidade total de 0,60 para 0,51 m³ m⁻³ depois de 21 dias de incubação, o que foi atribuído ao fato de a compactação ter alterado apenas os poros maiores, não afetando diretamente o acesso de microrganismos a poros de menor diâmetro.

O objetivo deste trabalho foi avaliar, sob condições controladas, os efeitos da compactação sobre a atividade microbiana e mineralização do C e N do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados dois solos com mineralogia distinta, um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) oxídico-gibbsítico e um Latossolo Amarelo (LA) caulínítico. Os solos foram coletados em povoamentos de eucalipto de 7 e 6 anos de idade, respectivamente, nos municípios de Santa Maria de Itabira e Santana do Paraíso, MG, na profundidade de 0-15 cm, secos ao ar, passados em peneira de 4 mm de malha e homogeneizados para posterior análise química e física (Quadro 1).

Quadro 1. Características dos solos utilizados no experimento

Característica	LVA	LA
COT (dag kg ⁻¹) ⁽¹⁾	2,76	2,20
N-total (dag kg ⁻¹) ⁽²⁾	0,15	0,13
N-NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹) ⁽³⁾	103,61	14,51
N-NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹) ⁽⁴⁾	2,28	7,87
pH ⁽⁵⁾	4,5	4,8
Equivalente de umidade (kg kg ⁻¹)	0,2	0,2
Densidade do solo (kg dm ⁻³)	1,05	1,10
Argila (g kg ⁻¹)	470	510
Silte (g kg ⁻¹)	90	40
Areia (g kg ⁻¹)	440	450
Classe textural	Argila	Argila
SiO ₂ (g kg ⁻¹) ⁽⁶⁾	71,29	135,19
Al ₂ O ₃ (g kg ⁻¹) ⁽⁶⁾	172,93	139,99
Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹) ⁽⁶⁾	60,64	44,64
Classe mineralógica	Oxídico-gibbsítico	Caulínítico

⁽¹⁾ Carbono orgânico total (Yeomans & Bremner, 1988); ⁽²⁾ Nitrogênio total (Bremner & Mulvaney, 1982); ⁽³⁾ Nitrogênio amoniacal (Kempers & Zweers, 1986); ⁽⁴⁾ Nitrogênio nítrico (Yang et al., 1998); ⁽⁵⁾ pH em água, relação 1:2,5; ⁽⁶⁾ Elementos no extrato do ataque sulfúrico (EMBRAPA, 1997).

O ensaio consistiu de oito tratamentos para cada solo, correspondendo a oito pressões de compactação. Os tratamentos, com seis repetições, foram dispostos em delineamento em blocos casualizados. A unidade experimental foi composta por anel de PVC, com 6 cm de altura e 4,55 cm de diâmetro interno, com volume útil de 97,6 cm³.

Calculou-se a quantidade de cada solo para ocupar o volume de 97,6 cm³ e atingir as densidades de 1,05 e 1,10 kg dm⁻³, respectivamente, no LVA e LA. A umidade das amostras foi elevada a 80 % do equivalente de umidade (EU) para posterior incubação por 14 dias em sacos plásticos abertos, visando possibilitar o desenvolvimento e estabilização (*steady state*) da atividade microbiana. A seguir as amostras de solo foram umedecidas (0,20 kg kg⁻¹ = 100 % do equivalente de umidade), acondicionadas nos vasos de PVC e compactadas em uma prensa CBR equipada com anel dinamométrico. As pressões de compactação foram 0, 60, 120, 240, 360, 540, 720 e 900 kPa. Foi calculada a densidade do solo resultante da compactação, por meio do novo volume ocupado por ele.

Posteriormente, os vasos foram submetidos a ventilação forçada de ar, na temperatura ambiente, para reduzir a umidade do solo a 70 % do EU. Em seguida, cada vaso foi individualmente disposto no interior de um pote de polietileno de 1 L com tampa rosqueável, que foi hermeticamente fechado, a fim de evitar trocas gasosas com o ambiente externo e reduzir a perda de água do solo por evaporação. Procedeu-se à incubação aeróbica dos solos por um período de 35 dias, sendo os potes abertos durante 10 minutos a cada 7 dias, para possibilitar a entrada de O₂, ocasiões em que a água perdida por evaporação era repostada.

Decorridos 21 dias do início do experimento e, provavelmente atingida a estabilização da atividade microbiana, foi avaliada a respiração basal (C-CO₂ mineralizado) nas duas últimas semanas. Para isso, no 22^o dia da incubação foi adicionado dentro dos potes plásticos um recipiente contendo 10 mL de NaOH 1 mol L⁻¹ para capturar o CO₂ respirado. Após um intervalo de 7 dias, os potes foram abertos e o CO₂ capturado foi precipitado como carbonato com excesso de BaCl₂ e o excesso de NaOH foi titulado com HCl 0,5 mol L⁻¹ (Anderson, 1982). O mesmo procedimento foi repetido na última semana. Concluída a incubação, foram realizadas análises químicas e microbiológicas em amostras dos solos. O carbono da biomassa microbiana (C_{MIC}) foi avaliado pelo método da irradiação-extração (Islam & Weil, 1998). O extrator utilizado foi K₂SO₄ 0,5 mol L⁻¹ (10 g solo : 30 mL) e o C orgânico contido nos extratos foi quantificado por meio de oxidação úmida, empregando solução de dicromato de potássio em meio ácido. O fator de conversão (K_C) usado para converter o

fluxo de C para C_{MIC} foi 0,33 (Sparling & West, 1988). O C orgânico total do solo (COT) foi quantificado por meio de oxidação da matéria orgânica via úmida (Yeomans & Bremner, 1988). Foi calculado o percentual de perda do COT ($COT_{inicial} - COT_{final}$)*100 / $COT_{inicial}$) durante o período de incubação (entre o 1º e 35º dia). Foram determinadas as seguintes formas de nitrogênio: N total, N- NH_4^+ , N- NO_3^- e calculado o N mineral (N- NH_4^+ + N- NO_3^-) e o N orgânico (N total – N mineral). O N total foi obtido por oxidação úmida seguida por determinação pelo método Kjeldahl (Bremner & Mulvaney, 1982); o N mineral foi extraído com solução de KCl 1 mol L⁻¹ (10 g de solo: 50 mL de extrator) por 10 min. Foram utilizados métodos colorimétricos para a determinação de N- NO_3^- (Yang et al., 1998) e N- NH_4^+ (Kempers & Zweepers, 1986). A taxa de mineralização líquida de N ($\mu\text{g g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) nas amostras corresponde ao aumento do N-mineral durante o período de incubação, e representa a mineralização líquida de N menos qualquer denitrificação que tenha ocorrido.

Os dados foram submetidos, individualmente para cada solo, à análise de variância e de regressão, sendo os coeficientes das equações ajustadas testados com base no quadrado médio do resíduo da ANOVA do experimento. Entre os modelos significativos, foi escolhido aquele que apresentou maior coeficiente de determinação (R^2).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os incrementos da densidade do solo em resposta à compactação atingiram 22,8 e 21,8 % para o LVA e LA, respectivamente (Figura 1).

Verificou-se no LVA decréscimo da produção de C- CO_2 (carbono mineralizado entre o 22º e 35º dia da incubação) em resposta à compactação do solo (Figura 1). Resultados semelhantes foram obtidos por Torbert & Wood (1992), onde a respiração do solo foi reduzida em 65 % quando a compactação elevou a densidade do solo de 1,4 para 1,8 kg dm⁻³. No entanto, no LA não houve efeito da compactação sobre a produção de C- CO_2 . Isto é atribuído ao rápido esgotamento da fração da matéria orgânica facilmente mineralizável neste solo durante o período inicial da incubação (1º ao 21º dia). Araújo et al. (2001), em ensaio de incubação de amostras de um Podzólico Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar, verificou que as maiores taxas de

mineralização de C e N ocorreram nas três primeiras semanas de incubação, diminuindo sensivelmente no período seguinte.

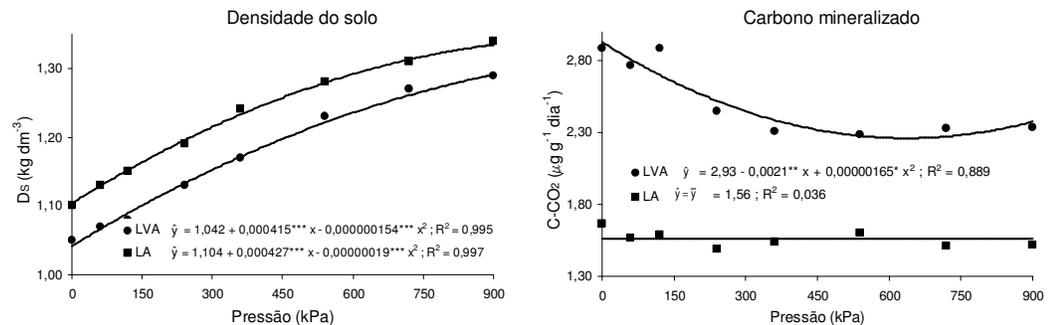


Figura 1. Densidade e carbono mineralizado de dois Latossolos compactados com diferentes pressões.

O carbono orgânico total do solo (COT) apresentou relação direta com a intensidade de compactação aplicada, em virtude do decréscimo linear da taxa de perda do carbono durante o período de incubação (Figura 2). Isto pode ser atribuído ao aumento da proteção física da matéria orgânica nos solos compactados em função da redução do diâmetro dos poros, dificultando o movimento da solução do solo e dos microrganismos decompositores por meio dela. Breland & Hansen (1996) relataram que a compactação reduz a porosidade total do solo e altera a distribuição de tamanho de poros, favorecendo o incremento da percentagem de poros menores, nos quais materiais orgânicos podem ser fisicamente protegidos da decomposição microbiana.

Verifica-se que houve alta taxa de perda de carbono em curto período de tempo (35 dias), especialmente nos solos submetidos a menores pressões (8,0 e 7,7 %, respectivamente, no LVA e LA submetidos à pressão de 60 kPa). Isto deve-se às condições ótimas de temperatura e umidade durante a incubação, proporcionando alta atividade microbiana e, conseqüentemente, alta taxa de decomposição das frações lábeis da matéria orgânica.

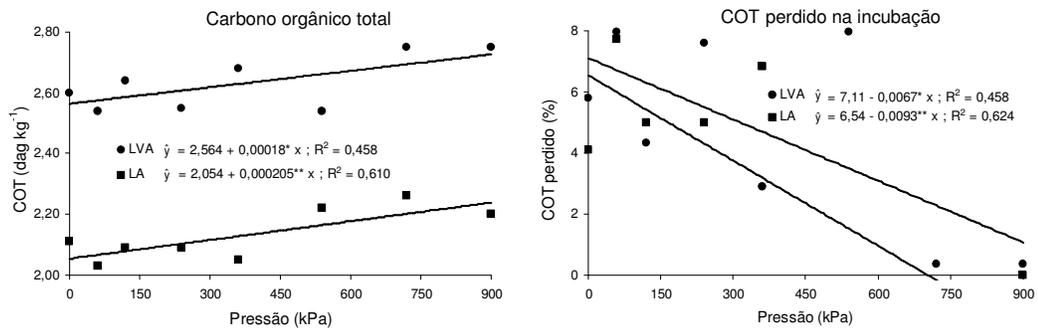


Figura 2. Carbono orgânico total e taxa de perda de carbono orgânico na incubação de dois Latossolos compactados com diferentes pressões.

O carbono da biomassa microbiana (C_{MIC}) exibiu comportamento quadrático em resposta ao aumento da pressão (Figura 3). Os maiores valores observados de C_{MIC} foram 27,3 e 24,5 $\mu\text{g g}^{-1}$, correspondentes às pressões de 240 e 120 kPa, respectivamente, no LVA e LA. O contato mais íntimo da matéria orgânica com os microrganismos do solo por efeito da compactação, pode ter proporcionado condições mais favoráveis ao crescimento da população microbiana nos tratamentos submetidos a estas menores pressões. No entanto, considerável decréscimo do C_{MIC} foi verificado em maiores níveis de compactação no LA no tratamento de 900 kPa (9,8 $\mu\text{g g}^{-1}$). Isto pode ser atribuído à maior proteção física da matéria orgânica, como discutido anteriormente, resultando em menos substrato disponível para a microbiota. Resultados semelhantes foram obtidos por Dick et al. (1988), que verificaram decréscimo de 38 % do C_{MIC} na profundidade de 10-20 cm de um solo florestal compactado pelo tráfego de máquinas em relação à testemunha não compactada. No entanto, em estudo de campo, Lee et al. (1996) verificaram em solo franco arenoso que, apesar do aumento da densidade do solo compactado pelo tráfego de um trator, não houve efeito da compactação sobre o C_{MIC} . Segundo esses autores nos solos de textura arenosa, o espaço poroso disponível não foi reduzido o bastante para afetar a atividade microbiana.

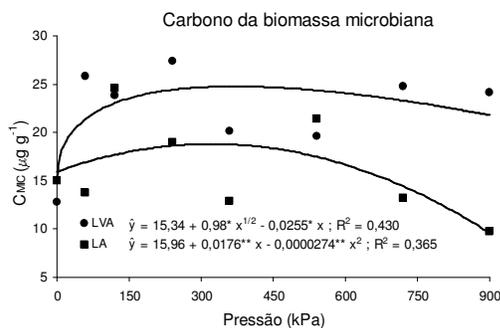


Figura 3. Carbono da biomassa microbiana de dois Latossolos compactados com diferentes pressões.

O nitrogênio amoniacal (N-NH_4^+) teve comportamento quadrático no LV e aumento linear no LA com a compactação do solo (Figura 4). Os maiores incrementos foram de 11,8 e 16,6 % nos tratamentos 240 e 900 kPa, respectivamente, no LVA e LA. O acúmulo de N-NH_4^+ sob condições anaeróbicas, eventualmente causadas pela compactação, pode ser atribuído à redução de N-NO_3^- para N-NH_4^+ por denitrificadores (Abbasi & Adams, 1999). Entretanto, muito deste amônio poderia ter sido formado pela decomposição anaeróbica do N orgânico do solo (Abbasi & Adams, 1999).

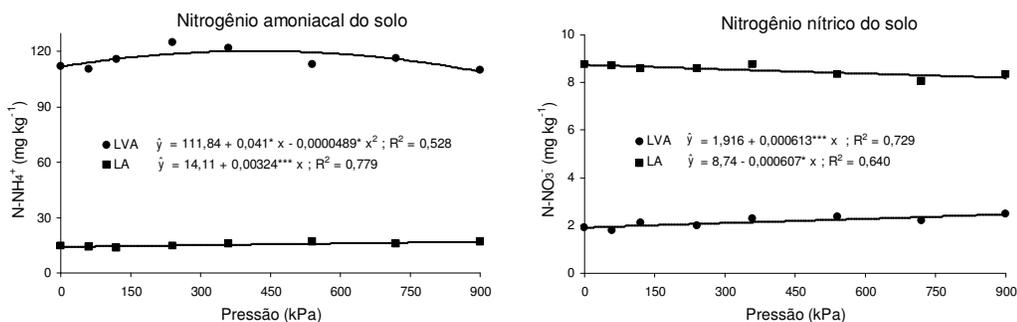


Figura 4. Nitrogênio amoniacal e nítrico de dois Latossolos compactados com diferentes pressões.

A compactação do solo proporcionou aumento de 28,6 % do nitrogênio nítrico (N-NO_3^-) no LVA e redução de 6,3 % no LA (Pressão = 900 kPa) (Figura 4). A compactação pode incrementar as condições anaeróbicas e promover perdas de N-NO_3^- por meio da denitrificação, que ocorre quando N-NO_3^- está presente em microsítios anaeróbicos, onde a demanda microbiana por O_2 excede o suprimento mediado pela difusão (Arah & Smith, 1989; Adams

& Akhtar, 1994). No entanto, o aumento de $N-NO_3^-$ no LVA indica que, mesmo sob altas pressões, em alguns microsítios do solo teria havido arejamento suficiente para a ação de organismos aeróbios.

Houve resposta quadrática do nitrogênio mineral ($N_{MIN} = N-NH_4^+ + N-NO_3^-$) no LVA e aumento linear no LA devido à compactação do solo (Figura 5). Os acréscimos atingiram 11,7 e 8,5 % nos tratamentos 240 e 900 kPa, respectivamente, no LVA e LA. É interessante observar o elevado predomínio do $N-NH_4^+$ na composição do N_{MIN} , especialmente no LVA (Figura 4). O teor médio de N_{MIN} no LVA foi 4,95 vezes maior em relação ao LA, ou seja, a disponibilidade de N_{MIN} no solo é maior no LVA.

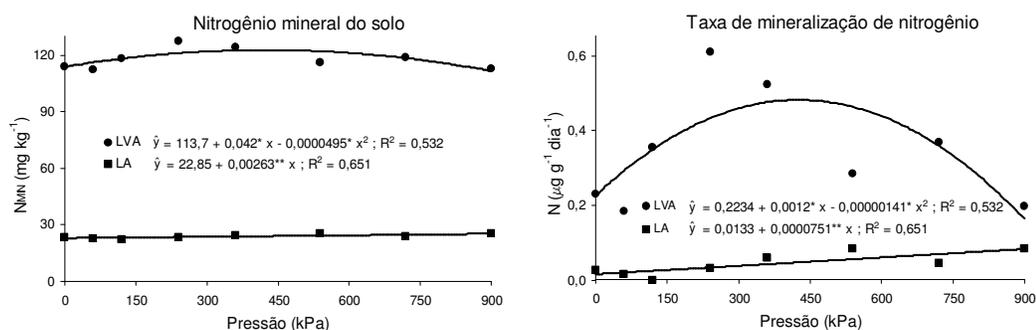


Figura 5. Nitrogênio mineral e taxa de mineralização de N de dois Latossolos compactados com diferentes pressões.

A taxa de mineralização líquida de nitrogênio teve efeito quadrático no LVA e aumento linear no LA em resposta à compactação do solo (Figura 5). Verifica-se que a mineralização de N foi maior no LVA em níveis intermediários de compactação, o que pode ser atribuído à maior atividade microbiana nestas pressões intermediárias durante os 35 dias de incubação. O provável aumento de perdas de $N-N_2O$ por denitrificação nos tratamentos com maiores níveis de compactação pode ter favorecido esse resultado, uma vez que a taxa de mineralização líquida de N corresponde ao aumento do N_{MIN} durante o período de incubação, e representa a mineralização líquida de N menos qualquer denitrificação que tenha ocorrido. A taxa de mineralização de N no LVA foi em média 8,3 vezes maior do que no LA. Isto provavelmente deve-se às diferenças de aeração, natureza e quantidade de matéria orgânica das amostras de solo (Broersma et al., 1996).

Houve diferença no modelo de resposta entre a mineralização de C e N (Figuras 2 e 5). Jensen et al. (1996b) atribuíram essa diferença à ocorrência de desnitrificação pela mudança do estatus de aeração do solo com o decréscimo de macroporos ocasionado pela compactação.

A compactação não afetou o N total e o N orgânico no LVA, mas houve resposta quadrática no LA (Figura 6). Em pressões intermediárias no LA pode ter ocorrido decréscimo da mineralização de N orgânico, devido à maior proteção física da MOS em poros de menor diâmetro, como discutido anteriormente para o COT. De acordo com Hassink et al. (1993) e Breland (1994) a mineralização de N é mais afetada pela proteção física do que a mineralização de C. Neste solo após 540 kPa, iniciou-se o decréscimo do N orgânico, o que sugere a provável ocorrência de perdas de N por desnitrificação pela formação de ambiente anaeróbico nos solos mais compactados. Segundo Hansen et al. (1993) perdas gasosas de N por desnitrificação podem aumentar devido à deficiência de oxigênio. Torbert & Wood (1992) verificaram incremento de 286 % nas perdas do N original do solo quando a compactação elevou a densidade de 1,4 para 1,8 kg dm⁻³, atribuindo tal resultado ao fato de a compactação ter mudado as condições do solo para um estado anaeróbico, resultando em redução da atividade microbiana aeróbica e aumento da desnitrificação.

A semelhança das curvas de resposta destas duas formas de N deve-se ao fato de o N orgânico constituir em média 93 e 98 % do N total, respectivamente, no LVA e LA.

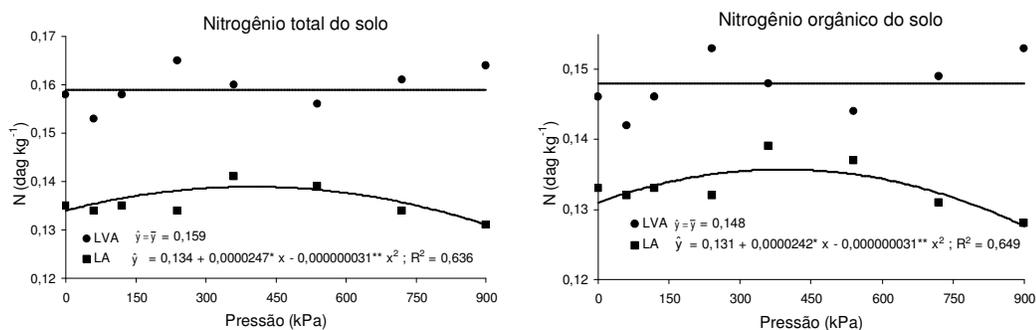


Figura 6. Nitrogênio total e orgânico de dois Latossolos compactados com diferentes pressões.

CONCLUSÕES

1. A compactação diminui a ciclagem de carbono orgânico do solo devido ao aumento da proteção física da matéria orgânica e à menor atividade microbiana aeróbica.
2. Pressões de compactação superiores a 540 kPa intensificam a formação de ambiente anaeróbico que promove perdas de nitrogênio por denitrificação.

LITERATURA CITADA

- ABBASI, M.K. & ADAMS, W.A. Assessment of the contribution of denitrification to N losses from compacted grassland soil by NO_3^- disappearance and N_2O production during anaerobic incubation. *Can. J. Soil Sci.*, 79:57-64, 1999.
- ADAMS, W.A. & AKHTAR, N. The possible consequences for herbage growth of waterlogging compacted pasture soils. *Plant Soil*, 162:1-17, 1994.
- ANDERSON, J.P.E. Soil respiration. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R. eds. *Methods of soil analysis*. 2.ed. Part 2. Madison: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1982. p.831-871.
- ARAH, J.R.M. & SMITH, K.A. Steady-state denitrification in aggregated soils: a mathematical model. *J. Soil Sci.*, 40:139-149, 1989.
- ARAÚJO, A.M.S.; SAMPAIO, E.V.S.B. & SALCEDO, I.H. Mineralização do C e do N em amostras armazenadas de solo cultivado com cana-de-açúcar, ao longo de dez anos, com e sem fertilização nitrogenada. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:43-53, 2001.
- BALBUENA, R.H.; TERMINIELLO, A.M.; CLAVERIE, J.A.; CASADO, J.P. & MARLATS, R. Compactación del suelo durante la cosecha forestal. Evolución de las propiedades físicas. *R. Bras. Eng. Agric. Ambient.*, 4:453-459, 2000.
- BRELAND, T.A. Enhanced mineralization and denitrification as a result of heterogeneous distribution of clover residues in soil. *Plant Soil*, 166:1-12, 1994.
- BRELAND, T.A. & HANSEN, S. Nitrogen mineralization and microbial biomass as affected by soil compaction. *Soil Biol. Biochem.*, 28:655-663, 1996.
- BREMNER, J.M. & MULVANEY, C.S. Nitrogen – Total. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R., eds. *Methods of soil analysis*, 2.ed. Part 2. Madison: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1982. p.595-624.

- BROERSMA, K.; JUMA, N.G. & ROBERTSON, J.A. Net nitrogen mineralization from a Gray Luvisol under diverse cropping systems in the Peace River region of Alberta. *Can. J. Soil Sci.*, 76:117-123, 1996.
- CRASWELL, E.T. & MARTIN, A.E. Effects of moisture content on denitrification in clay soil. *Soil Biol. Biochem.*, 6:127-129, 1974.
- DICK, R.P.; MYROLD, D.D. & KERLE, E.A. Microbial biomass and soil enzyme activities in compacted and rehabilitated skid trail soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:512-516, 1988.
- HANSEN, S.; MAEHLUM, J.E. & BAKKEN, L.R. N₂O and CH₄ fluxes in soil influenced by fertilization and tractor traffic. *Soil Biol. Biochem.*, 25:621-630, 1993.
- HASSINK, J. Effects of soil texture and grassland management on soil organic C and N and rates of C and N mineralization. *Soil Biol. Biochem.*, 26:1221-1231, 1994.
- HASSINK, J.; BOUWMAN, L.A.; ZWART, K.B. & BRUSSAARD, L. Relationship between habitable pore space, soil biota and mineralization rates in grassland soils. *Soil Biol. Biochem.*, 25:47-55, 1993.
- ISLAM, K.R. & WEIL, R.R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. *Biol. Fert. Soils*, 27:408-416, 1998.
- JENSEN, L.S.; MCQUEEN, D.J. & SHEPHERD, T.G. Effects of compaction on N-mineralization and microbial-C and -N. I. Field measurements. *Soil Till. Res.*, 38:175-188, 1996a.
- JENSEN, L.S.; McQUEEN, D.J.; ROSS, D.J. & TATE, K.R. Effects of soil compaction on N-mineralization and microbial-C and -N. II. Laboratory simulation. *Soil Till. Res.*, 38:189-202, 1996b.
- KEMPERS, A.J. & ZWEERS, A. Ammonium determination in soil extracts by the salicylate method. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 17:715-723, 1986.
- LEE, W.J.; WOOD, C.W.; REEVES, D.W.; ENTRY, J.A. & RAPER, R.L. Interactive effects of wheel-traffic and tillage system on soil carbon and nitrogen. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 27:3027-3043, 1996.
- LINN, D.M. & DORAN, J.W. Effects of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:1267-1272, 1984.
- MYERS, R.J.K.; CAMPBELL, C.A. & WEIER, K.L. Quantitative relationship between net nitrogen mineralization and moisture content of soils. *Can. J. Soil Sci.*, 62:111-114, 1982.

- PARR, J.F. & REUSZER, H.W. Organic matter decomposition as influenced by oxygen level and flow rate of gases in the constant aeration method. *Soil Sci. Am. Proc.*, 26:552-556, 1962.
- SPARLING, G.P. & WEST, A.W. A direct extraction method to estimate soil microbial C: Calibration in situ using microbial respiration and ¹⁴C labelled cells. *Soil Biol. Biochem.*, 20:337-343, 1988.
- STARTSEV, A.D. & McNABB, D.H. Effects of skidding on forest soil infiltration in west-central Alberta. *Can. J. Soil Sci.*, 80:617-624, 2000.
- TORBERT, H.A. & WOOD, C.W. Effects of soil compaction and water-filled pore space on soil microbial activity and N losses. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 23:1321-1331, 1992.
- WERT, S. & THOMAS, B.R. Effects of skid roads on diameter, height, and volume growth in Douglas-fir. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45:629-632, 1981.
- WHALLEY, W.R.; DUMITRU, E. & DEXTER, A.R. Biological effects of soil compaction. *Soil Till. Res.*, 35:53-68, 1995.
- YANG, J.E.; SKOGLEY, E.O.; SCHAFF, B.E. & KIM, J.J. A simple spectrophotometric determination of nitrate in water, resin, and soil extracts. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62:1108-1115, 1998.
- YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 19:1467-1476, 1988.

EXPERIMENTO 4

CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DE EUCALIPTO EM RESPOSTA A COMPACTAÇÃO DO SOLO EM DIFERENTES UMIDADES

RESUMO

O crescimento radicular e a produtividade de eucalipto são diretamente afetados pela compactação do solo durante as operações florestais, particularmente pela colheita de madeira, cujos efeitos são intensificados sob condições de alta umidade do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de níveis de compactação do solo com diferentes umidades sobre o crescimento e nutrição de mudas de eucalipto. Foram utilizados um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) oxídico-gibbsítico, e um Latossolo Amarelo (LA) caulínítico. O ensaio consistiu de um fatorial composto por cinco níveis de compactação e três conteúdos de água no solo. Os tratamentos, com quatro repetições, foram dispostos em delineamento em blocos casualizados. A unidade experimental foi composta por anel de PVC de 100 mm de diâmetro, com volume útil de 1,66 dm³. Calculou-se a quantidade de cada solo para ocupar o volume de 1,66 dm³ e atingir as densidades de 1,05 e 1,10 kg dm⁻³, respectivamente, no LVA e LA. A seguir as amostras de solo foram adubadas, umedecidas, acondicionadas em vasos de PVC e compactadas em uma prensa CBR equipada com anel dinamométrico. As pressões de compactação foram 0, 60, 120, 180 e 240 kPa, e os conteúdos de água 0,05; 0,10 e 0,20 kg kg⁻¹ (100% do equivalente de umidade). Após a aplicação da pressão, determinou-se a densidade resultante por meio do novo volume ocupado pelo solo. O experimento foi colhido 60 dias após a emergência das plântulas de eucalipto, para determinação da matéria seca de raízes e parte aérea, da densidade radicular e do conteúdo total de nutrientes na planta. Houve aumento da densidade dos solos em resposta à compactação, sendo a manifestação deste efeito intensificada com o aumento da umidade do solo. No solo oxídico-gibbsítico (LVA) a produção de matéria seca de raízes e total, a densidade radicular e o conteúdo de nutrientes na planta foram reduzidos pela compactação do solo em maior conteúdo de água (0,20 kg kg⁻¹). Observou-se neste solo que, em menores valores de umidade durante a compactação, não

houve efeito do aumento da pressão sobre a produtividade do eucalipto. Os nutrientes cuja absorção foi mais afetada pela compactação do solo com maior umidade ($0,20 \text{ kg kg}^{-1}$) foram: $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{P} = \text{Mg}$ no solo oxidico-gibbsítico; e K no solo caulínítico (LA). O solo caulínítico foi mais sensível aos efeitos da compactação do que o solo oxidico-gibbsítico, limitando com maior intensidade, principalmente, a produção de matéria seca de raiz e a absorção de Fe, Cu, N, S e Zn. Conclui-se que a umidade no momento da compressão do solo foi o fator determinante para a manifestação dos efeitos deletérios da compactação sobre o crescimento e nutrição do eucalipto.

Termos para indexação: Densidade do solo, densidade radicular, nutrição de plantas, mineralogia do solo.

SUMMARY: Eucalyptus growth and nutrition as affected by soil compaction in different moistures

The root growth and productivity of eucalyptus are affected directly by soil compaction during forestry operations, particularly harvesting. These effects are intensified under high soil moisture. An experiment was carried out under controlled conditions in order to evaluate the effects of compaction, under distinct levels soil moisture, on eucalyptus growth. An oxidic-gibbsitic Red Yellow Latosol (LVA), and a caulinitic Yellow Latosol (LA), were used. The experiment consisted of a 5×3 factorial (compaction levels and soil volumetric water content) for each soil. The treatments, with four replicates, were disposed in a randomized block design. The experimental unit was composed by a PVC pipe (100 mm of internal diameter), with an effective volume of 1.66 dm^3 . A quantity of soil was calculated to occupy 1.66 dm^3 and reach the density bulk of 1.05 and 1.10 kg dm^{-3} , respectively in LVA and LA. Subsequently the samples of soils were fertilized, moistened, placed in pots made of PVC pipe and compacted with a CBR press. The pressure of compaction were 0, 60, 120, 180 e 240 kPa , and soil volumetric water content were 0.05 , 0.10 e 0.20 kg kg^{-1} (field capacity). After soil compaction, was calculated the resulting bulk density according to the new volume occupied by the soil. Sixty days after eucalyptus seedling emergence, the plants was harvested and assessed the dry weight of root and shoot, root density and plant nutrient content. The increase of bulk density by soil compaction was intensified by soil moisture. Increasing soil

compaction reduced root and shoot growth, root density and plant nutrient content, in high volumetric water content (0.20 kg kg^{-1}) in oxidic-gibbsitic soil (LVA), but did not affect eucalypt yield dry matter in low levels of volumetric water content. The nutrients uptake more affected by soil compaction (volumetric water content = 0.20 kg kg^{-1}) were: $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{P} = \text{Mg}$, in oxidic-gibbsitic soil; and K in caulinitic soil. The caulinitic soil was more sensitive to compaction with regard to oxidic-gibbsitic soil, to restrict yield dry matter of root and Fe, Cu, N, S and Zn uptake. This study indicated that soil moisture was the principal factor for occurrence the negative effects of soil compaction in the eucalyptus growth and nutrition.

Index terms: Soil bulk density, root density, plant nutrition, soil mineralogy.

INTRODUÇÃO

Um dos problemas no manejo de máquinas florestais é decidir quando as operações mecanizadas de colheita e preparo do solo devem ser realizadas, considerando a condição de umidade do solo, que é fator determinante de sua capacidade de suporte de carga (Dias Júnior, 2000). Quando seco, o solo é bastante coeso e apresenta grande resistência à compactação, mas, à medida que ele vai umedecendo, ocorre a formação de um pequeno filme de água entre os agregados, facilitando o deslocamento e o rearranjo das partículas do solo, diminuindo sua resistência à compactação (Hillel, 1980).

A compactação reduz o crescimento de plantas por seu efeito no crescimento de raízes e conseqüente redução na absorção de água e de nutrientes (Misra & Gibbons, 1996; Mapfumo et al., 1998; Ishaq et al., 2001).

Silva et al. (2002) verificaram que a compactação do solo restringiu o crescimento e aumentou o diâmetro médio de raízes de eucalipto, e proporcionou redução do acúmulo de K na planta, reduzindo a eficiência de utilização de K e a eficiência da adubação potássica. Rosolem et al. (1994) obtiveram decréscimo significativo da produção de matéria seca de raízes e do conteúdo total de N em plantas de soja com o aumento da densidade do solo. Shierlaw & Alston (1984) verificaram decréscimo do comprimento radicular e da matéria seca de plantas de milho em resposta à compactação do solo, além de ter ocorrido maior absorção de fósforo, por unidade de comprimento de raiz, em solos compactados do que naqueles sem compactação.

Oberhauser et al. (2002), em experimento de compactação de dois Latossolos com diferentes umidades, verificaram que houve decréscimo da produção de matéria seca e do comprimento radicular de *Eucalyptus grandis*, cujos efeitos negativos foram mais pronunciados nos tratamentos com maior conteúdo de água no solo durante a compactação.

Apesar de representar um problema para o crescimento de florestas manejadas, poucos experimentos foram conduzidos para estimar os efeitos da compactação sobre o desenvolvimento de eucalipto. Estudos conduzidos em condições mais controladas podem servir para avaliar os efeitos da compactação sobre o crescimento de raízes e da parte aérea e sobre a nutrição das plantas.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de pressões de compactação do solo com diferentes umidades sobre o crescimento e nutrição de mudas de eucalipto.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados dois solos com mineralogias distintas, um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) oxídico-gibbsítico e um Latossolo Amarelo (LA) caulínítico. Os solos foram coletados em povoamentos de eucalipto, na profundidade de 0-15 cm, secos ao ar, passados em peneira de 4 mm de malha e homogeneizados, para posterior análise química e física (Quadro 1).

Antes do cultivo foi realizada adubação com os seguintes nutrientes, em mg dm^{-3} : 50 de N, 300 de P, 75 de K, 40 de S, 0,81 de B, 1,33 de Cu, 1,55 de Fe, 3,66 de Mn, 0,15 de Mo e 4 de Zn. Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram nivelados nos solos para 2,02 e 0,5 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente. A adubação de cobertura, contendo 50 mg dm^{-3} de N e 75 mg dm^{-3} de K, foi realizada aos 40 dias após a emergência das plântulas.

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação, utilizando delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições, em esquema fatorial constituído por cinco níveis de pressão de compactação e três de umidade do solo. Foram utilizados tubos de PVC de 100 mm de diâmetro com fundo de isopor, com capacidade de 1,88 dm^3 , contendo um volume constante de solo de 1,66 dm^3 . Calculou-se a quantidade de cada solo para ocupar o volume de 1,66 dm^3 e atingir as densidades de 1,05 e 1,10 kg dm^{-3} ,

respectivamente, no LVA e LA. No entanto, antes de serem acondicionadas nos vasos, as amostras de solo tiveram a umidade elevada até atingir os conteúdos de água estabelecidos para os respectivos tratamentos. A seguir, foi realizada a compactação dos solos em uma prensa hidráulica equipada com anel dinamométrico. As pressões de compactação do solo foram 0, 60, 120, 180 e 240 kPa, e as umidades (Uc) do solo durante a compactação foram 0,05; 0,10 e 0,20 kg kg⁻¹ (100 % do equivalente de umidade). Após a aplicação da pressão, determinou-se a densidade do solo. Foi semeado *Eucalyptus urophylla* e após a emergência desbastou-se, deixando uma planta por vaso.

Quadro 1. Caracterização dos solos utilizados no experimento

Característica	LVA	LA
COT (dag kg ⁻¹) ⁽¹⁾	2,76	2,20
N-total (dag kg ⁻¹) ⁽²⁾	0,15	0,13
P (mg dm ⁻³) ⁽³⁾	0,78	5,14
K (mg dm ⁻³) ⁽³⁾	24	29
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽⁴⁾	0,18	1,02
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ⁽⁴⁾	0,07	0,15
Zn (mg dm ⁻³) ⁽³⁾	1,40	2,77
Fe (mg dm ⁻³) ⁽³⁾	37,50	46,67
Mn (mg dm ⁻³) ⁽³⁾	1,50	8,00
Cu (mg dm ⁻³) ⁽³⁾	0,56	0,66
pH ⁽⁵⁾	4,5	4,8
Equivalente de umidade (kg kg ⁻¹)	0,2	0,2
Densidade do solo (kg dm ⁻³)	1,05	1,10
Argila (g kg ⁻¹)	470	510
Silte (g kg ⁻¹)	90	40
Areia (g kg ⁻¹)	440	450
Classe textural	Argila	Argila
SiO ₂ (g kg ⁻¹) ⁽⁶⁾	71,29	135,19
Al ₂ O ₃ (g kg ⁻¹) ⁽⁶⁾	172,93	139,99
Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹) ⁽⁶⁾	60,64	44,64
Classe mineralógica	Oxídico-gibbsítico	Caulinítico

⁽¹⁾ Carbono orgânico total (Yeomans & Bremner, 1988); ⁽²⁾ Nitrogênio total (Bremner & Mulvaney, 1982); ⁽³⁾ Extrator Mehlich-1 (Mehlich, 1978); ⁽⁴⁾ Extrator KCl 1 mol L⁻¹; ⁽⁵⁾ pH em água, relação 1:2,5; ⁽⁶⁾ Extrato do ataque sulfúrico (EMBRAPA, 1997).

O experimento foi colhido 60 dias após a emergência das plântulas, sendo realizada a determinação da matéria seca da parte aérea (MSPA) das plantas, após secagem em estufa a 65 °C por 72 h. Foi retirada em cada vaso, ao lado da planta, uma amostra de solo ao longo de todo o perfil do vaso com auxílio de trado com 3,80 cm de diâmetro interno. A amostra foi submetida a lavagem em água corrente, sobre peneira de 0,25 mm de abertura para retirada de raízes, a serem utilizadas na mensuração do comprimento radicular pelo método da intercepção de linhas (Tennant, 1975). Estimou-se a densidade radicular (DR) pela divisão do comprimento radicular pelo volume de solo amostrado. Após esta mensuração, as raízes foram secas para determinação da matéria seca (MSR1). As raízes restantes em cada vaso foram lavadas em água corrente sobre peneira de 0,25 mm de abertura e secas em estufa para determinação da matéria seca (MSR2). Desta forma obteve-se a matéria seca total de raízes ($MSR = MSR1 + MSR2$). Do somatório da MSPA e MSR obteve-se a matéria seca total (MST).

Amostras de material vegetal foram submetidas à digestão nítrico-perclórica (Johnson & Ulrich, 1959) para se determinar os teores dos nutrientes: P por colorimetria pelo método do azul de molibdênio (Braga & Defelipo, 1974); K por fotometria de chama; Ca, Mg, Zn, Cu, Fe e Mn por espectrofotometria de absorção atômica. O N foi obtido por oxidação úmida e determinado pelo método Kjeldahl (Bremner & Mulvaney, 1982). Foi obtido o conteúdo total dos nutrientes na planta pelo somatório do produto dos teores pela MSR e MSPA.

Os resultados, individualmente para cada solo, foram submetidos à análise de variância, de correlação e de regressão, sendo os coeficientes das equações ajustadas testados com base no quadrado médio do resíduo da ANOVA do experimento. Entre os modelos significativos, foi escolhido aquele que apresentou maior coeficiente de determinação (R^2).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve aumento da densidade dos solo (D_s) em resposta às pressões de compactação, sendo a manifestação deste efeito intensificada com o aumento da umidade do solo (Figura 1). Os incrementos atingiram 5,4 e

10,9 %, respectivamente, no LVA e LA, nos solos compactados com pressão de 240 kPa na maior umidade (0,20 kg kg⁻¹), próximo à capacidade de campo.

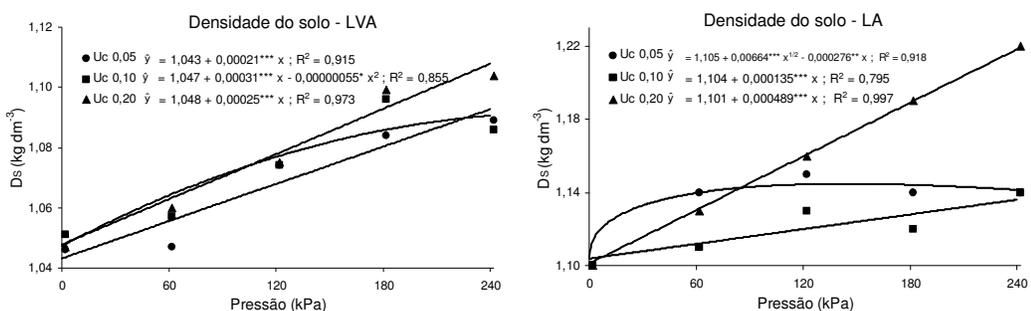


Figura 1. Densidade de dois Latossolos compactados com diferentes pressões e umidades.

O maior aumento da D_S no LA é devido à mineralogia deste solo, pois a caulinita se modela e, ou, deforma mais facilmente do que os óxidos quando sujeita à pressão, especialmente sob umidade elevada. Por sua vez, o LVA possui predomínio de óxidos de Fe e de Al, apresentando agregados pequenos e extremamente estáveis, que conferem ao LVA maior resistência à deformação quando sujeito à pressão.

No LVA, a produção de matéria seca de raízes (MSR) e total (MST) e a densidade radicular (DR) foram reduzidas pela compactação do solo na maior umidade (0,20 kg kg⁻¹) (Figura 2). Neste solo esta redução atingiu 40, 30 e 39 %, respectivamente, para MSR, MST e DR (pressão de 240 kPa e Uc = 0,20 kg kg⁻¹). A compactação reduz o crescimento das plantas por seu efeito no crescimento de raízes e conseqüente redução na absorção de água e de nutrientes (Mapfumo et al., 1998; Ishaq et al., 2001; Silva et al., 2002).

Observou-se no LVA que, em baixos valores de umidade, não houve efeito do aumento da pressão sobre a produção do eucalipto, demonstrando que a água é o fator determinante para a manifestação dos efeitos da compactação, pois facilita o ajuste de partículas e reduz a resistência dos agregados à deformação física.

No LA, não houve resposta às pressões de compactação quanto à produção de MSR e MST (exceção para Uc = 0,05 kg kg⁻¹ em que houve ganhos de MST com a compactação) (Figura 2). No entanto, o aumento da pressão, em maiores conteúdos de água no solo (0,10 e 0,20 kg kg⁻¹),

acarretou redução da DR. Esta redução da densidade de raízes por efeito da compactação também foi obtida por outros pesquisadores (Misra & Gibbons, 1996; Nadian et al., 1996; Coelho et al., 2000; Ishaq et al., 2001).

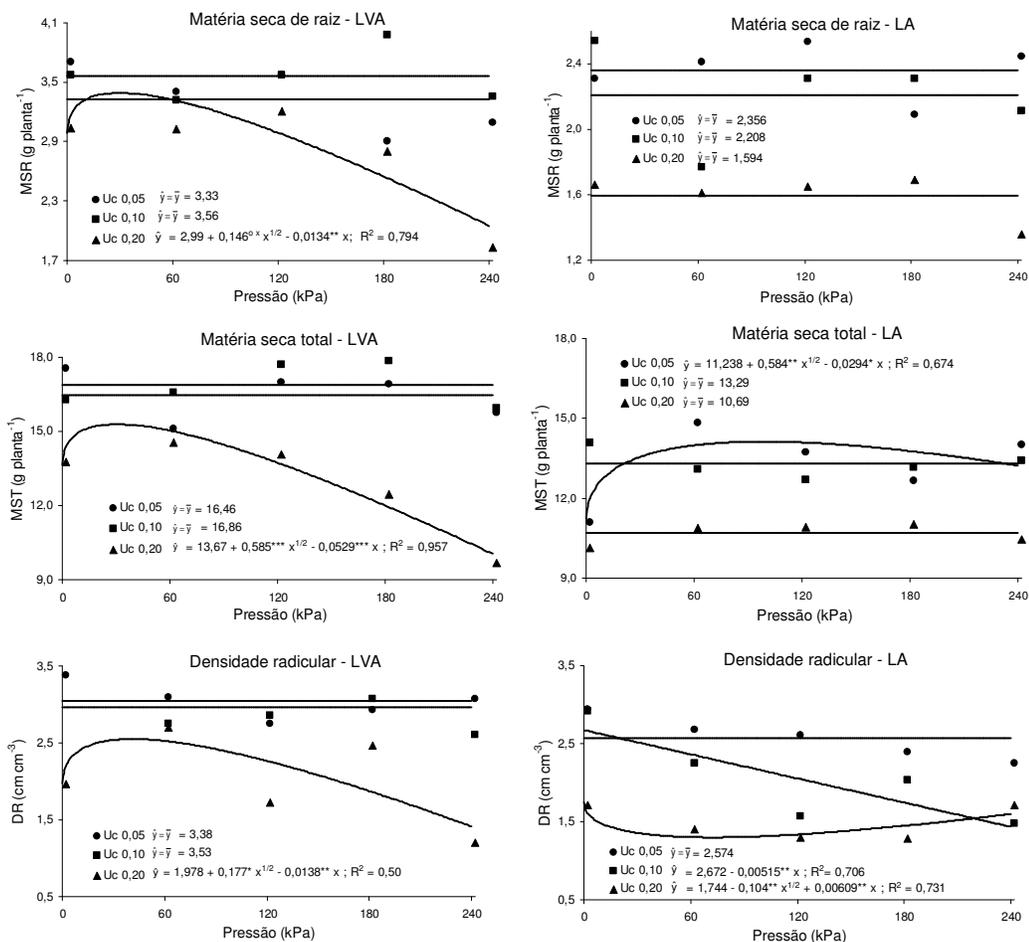


Figura 2. Densidade radicular, matéria seca de raiz e total de eucalipto em dois Latossolos compactados com diferentes pressões e umidades.

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 CO₂, etileno e fitotoxinas são os fatores principais (Marschner, 1995). Quando a concentração de O₂ 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).

No LVA e LA foi evidenciado o efeito negativo de maiores conteúdos de água no solo durante a compactação, ocasionando redução da produção de matéria seca e densidade radicular. É importante observar que, mesmo no tratamento cujo solo não foi compactado na prensa (pressão = 0 kPa), houve menores valores de MSR, MST e DR justamente nos tratamentos com maior conteúdo de água ($0,20 \text{ kg kg}^{-1}$) (Figura 2). Isto é atribuído ao umedecimento das amostras de solo, segundo os tratamentos ($U_c = 0,05; 0,10 \text{ e } 0,20 \text{ kg kg}^{-1}$), antes de serem colocadas nos vasos, ocorrendo maior expansão de volume naqueles solos mais úmidos. Desta forma, ao serem acondicionadas nos vasos para ocupar o volume de $1,66 \text{ dm}^3$ e atingir as densidades de $1,05$ e $1,10 \text{ kg dm}^{-3}$, respectivamente, no LVA e LA, ocorreu compressão adicional do solo e ajuste de partículas durante a realização deste procedimento, especialmente nos solos mais úmidos, mesmo que não tenha ocorrido alteração da densidade final. No entanto, esse ajuste de partículas parece ter permanecido durante a condução do experimento, podendo ter ocorrido selamento parcial do solo que prejudicou o crescimento de raízes. Este fato é mais evidente no LA, o que pode ser atribuído à morfologia laminar da caulinita (filossilicato) e à sua capacidade de modelagem e, ou, deformação sob alta umidade.

Houve resposta diferenciada com respeito ao acúmulo de cada nutriente na planta (Figuras 3, 4 e 5). Isto é devido à grande complexidade e interação dos fatores envolvidos nos processos de transporte de nutrientes no solo e absorção destes pelas raízes das plantas, ambos influenciados pela compactação. Para que atinjam os sítios de absorção das raízes, os nutrientes devem ser transportados na solução do solo (Jungk, 1991). Os mecanismos de transporte – fluxo de massa e difusão – são dependentes do tipo de solo e do crescimento radicular. Por isso, a influência da compactação sobre esses mecanismos não apresenta comportamento específico. Há trabalhos que mostram que o transporte é aumentado e outros que é diminuído pela compactação (Shierlaw & Alston, 1984; Lowery & Schuler, 1991; Dolan et al., 1992; Rosolem et al., 1994; Novais & Smyth, 1999).

Observa-se que o acúmulo da maioria dos nutrientes em resposta às crescentes pressões de compactação acompanhou a curva de produção de MST, o que fica evidente por meio das significativas ($p < 0,001$), positivas e

altas correlações obtidas no LVA entre MST e conteúdo total de N ($r = 0,766$), P ($r = 0,925$), K ($r = 0,751$), Ca ($r = 0,833$), Mg ($r = 0,872$), S ($r = 0,794$), Zn ($r = 0,796$), Fe ($r = 0,631$), Cu ($r = 0,563$) e Mn ($r = 0,554$). No LA essas correlações, apesar de menores na maioria das vezes, também foram altamente significativas ($p < 0,001$): N ($r = 0,733$), P ($r = 0,514$), K ($r = 0,821$), Ca ($r = 0,718$), Mg ($r = 0,793$), S ($r = 0,653$), Zn ($r = 0,448$), Fe ($r = 0,486$), Cu ($r = 0,387$) e Mn ($r = 0,413$).

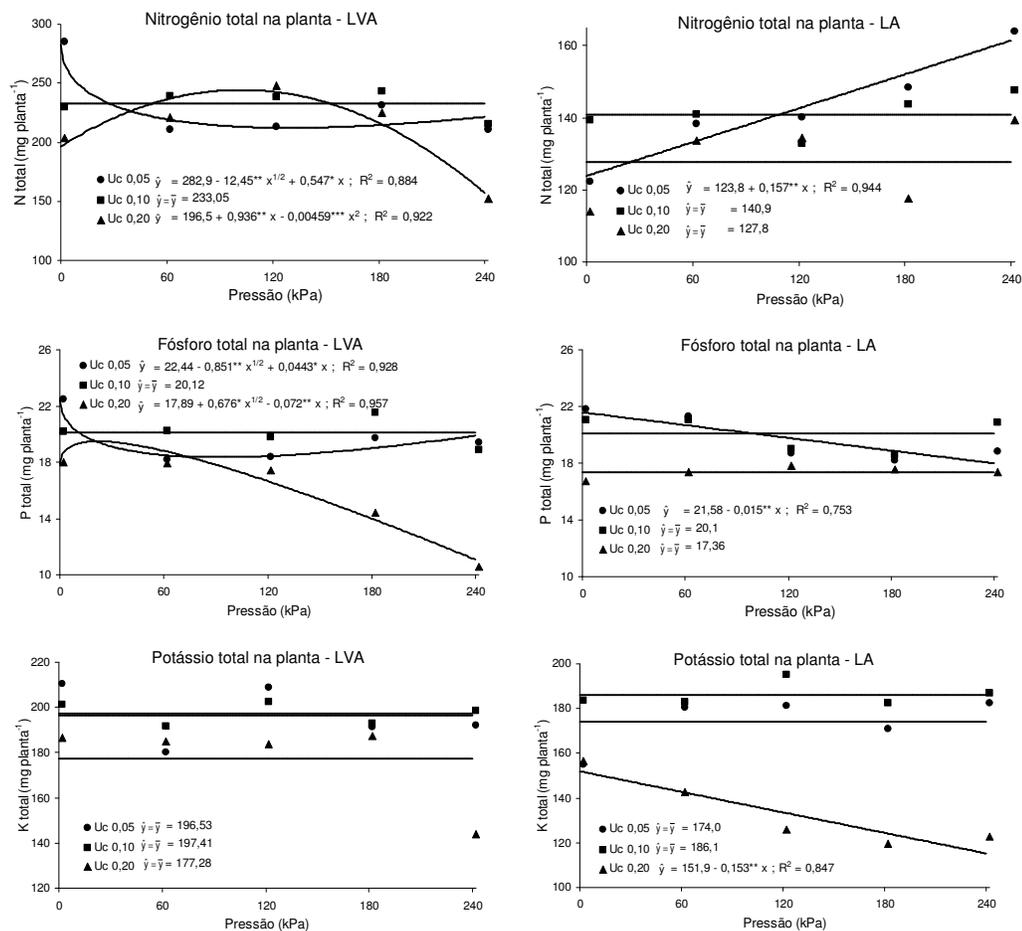


Figura 3. Conteúdos de nitrogênio, fósforo e potássio na matéria seca total de eucalipto em dois Latossolos compactados com diferentes pressões e umidades.

Nos tratamentos com maior conteúdo de água no solo no momento da compactação, houve maior efeito negativo das pressões sobre o acúmulo de alguns nutrientes nas plantas. No LVA os nutrientes que tiveram o acúmulo na planta mais afetado pela compactação (pressão = 240 kPa; e Uc = 0,20 kg kg⁻¹)

foram, em ordem decrescente: Fe (-58 %) > Zn (-53 %) > Cu (-43 %) > P (-41 %) = Mg (-41 %) > Ca (-38 %) > S (-33 %) > N (-25 %) > Mn (-18 %). No LA estes efeitos foram maiores para o K (-22 %). Esta redução do acúmulo de nutrientes pelas plantas é consequência direta do menor crescimento radicular em solos compactados. Para alguns nutrientes, como o P, a compactação reduz também o fluxo difusivo na solução solo, como observado por Shierlaw & Alston (1984) e Nadian et al. (1996).

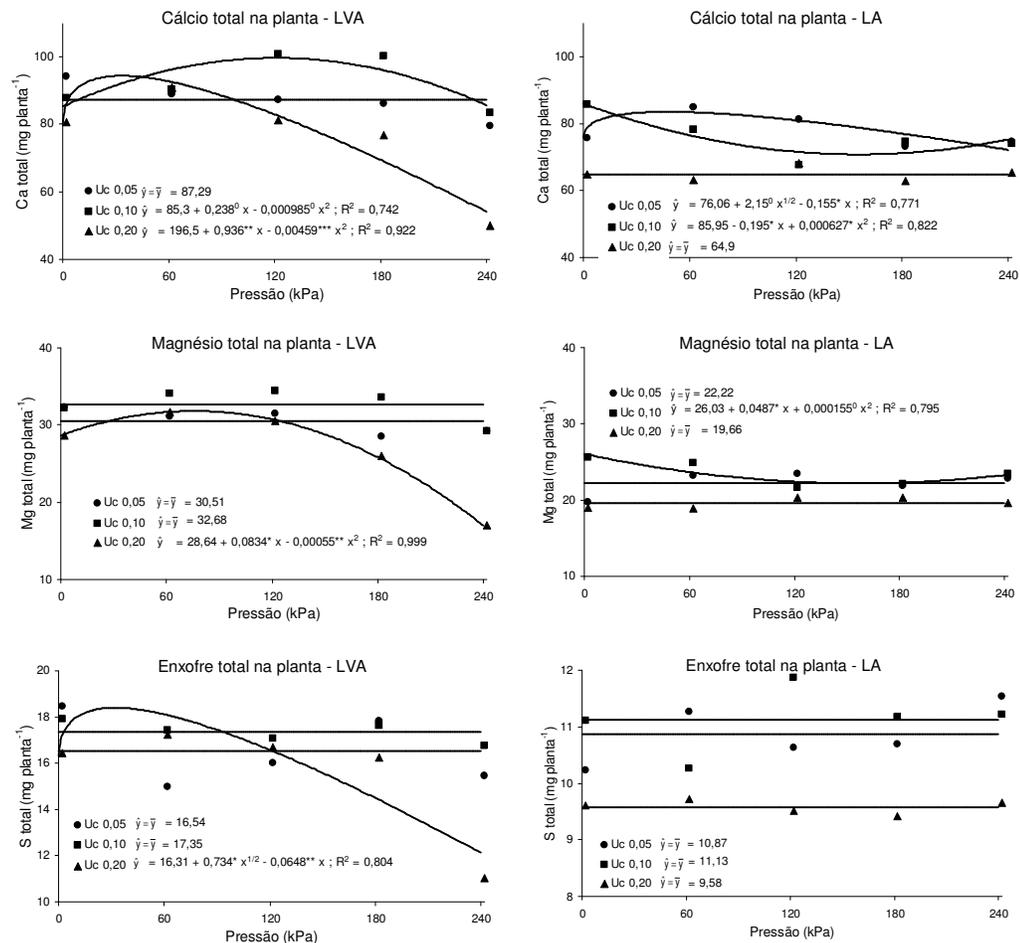


Figura 4. Conteúdos de cálcio, magnésio e enxofre na matéria seca total de eucalipto em dois Latossolos compactados com diferentes pressões e umidades.

Observa-se em algumas situações que um nível intermediário de compactação do solo favoreceu o acúmulo de alguns nutrientes na planta, destacando-se N (Uc = 0,20 kg kg⁻¹ no LVA; e Uc = 0,05 kg kg⁻¹ no LA); Ca (Uc = 0,10 kg kg⁻¹ no LVA; e Uc = 0,05 kg kg⁻¹ no LA); Mg, S, Zn, Fe e Mn (Uc =

0,20 kg kg⁻¹ no LVA); e Cu (Uc = 0,10 kg kg⁻¹ no LVA). Segundo Oliveira et al. (1998) com o aumento da densidade do solo, a difusão aumenta até atingir um máximo e depois decresce. Esse aumento deve-se à 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.

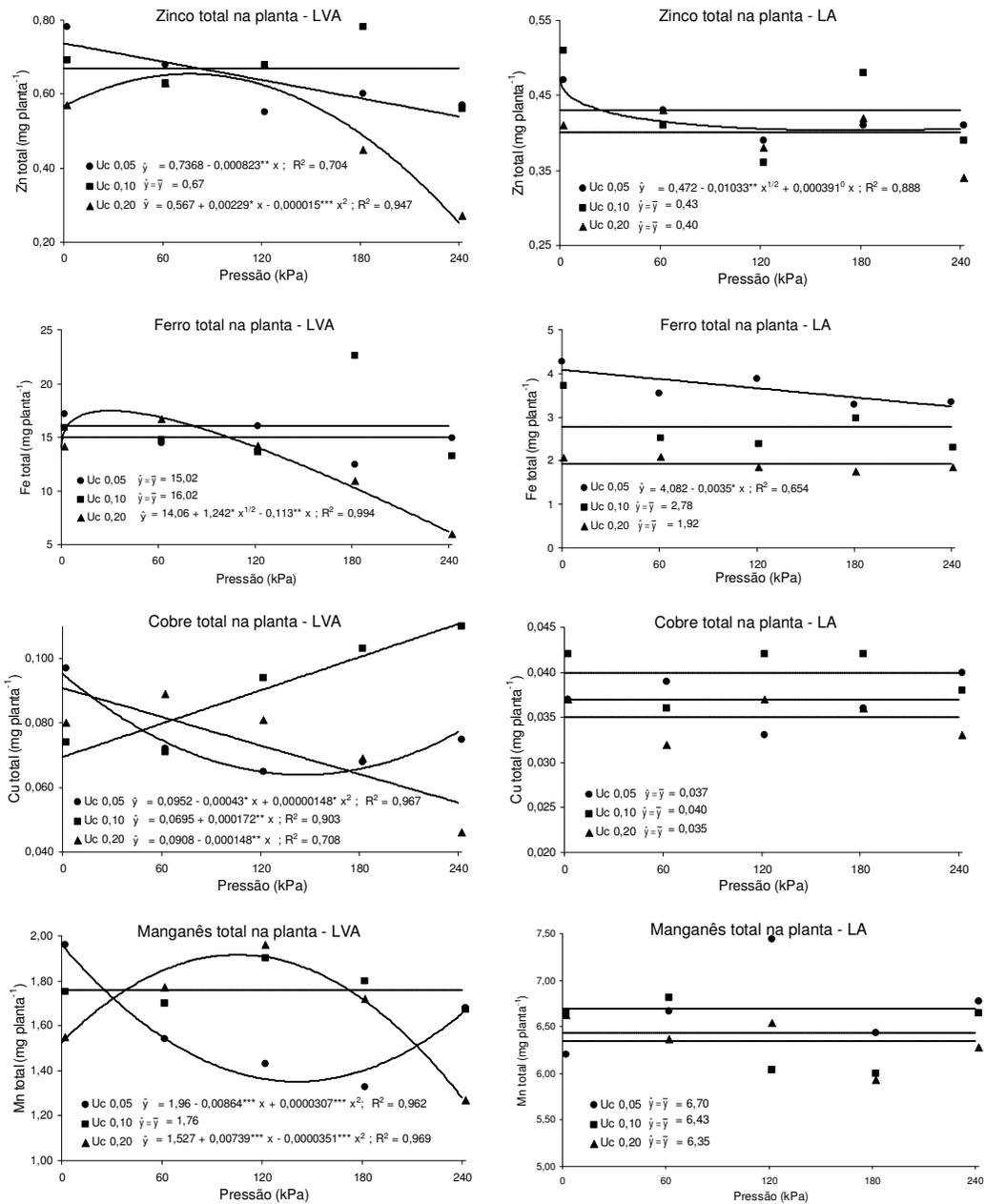


Figura 5. Conteúdos de zinco, ferro, cobre e manganês na matéria seca total de eucalipto em dois Latossolos compactados com diferentes pressões e umidades.

Verifica-se que as plantas cultivadas no solo caulínítico acumularam, de modo geral, menor quantidade de nutrientes em relação ao solo oxídico-gibbsítico, principalmente de Fe, Cu, N, S e Zn. Isto deve-se principalmente ao menor crescimento radicular e produção de matéria seca no LA.

CONCLUSÕES

1. A umidade no momento da compressão do solo foi o fator determinante para a manifestação dos efeitos deletérios da compactação sobre o crescimento e nutrição do eucalipto.
2. Os nutrientes cuja absorção foi mais afetada pela compactação do solo com maior umidade ($0,20 \text{ kg kg}^{-1}$) foram: $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{P} = \text{Mg}$ no solo oxídico-gibbsítico (LVA); e K no solo caulínítico (LA).
3. O solo caulínítico foi mais sensível aos efeitos da compactação do que o solo oxídico-gibbsítico, limitando com maior intensidade, principalmente, a produção de matéria seca de raiz e a absorção de Fe, Cu, N, S e Zn.

LITERATURA CITADA

- 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.
- BRAGA, J.M. & DEFELIPO, B.V. 1974. Determinação espectrofotométrica de P em extratos de solo e material vegetal. R. Ceres, 21:73-85, 1974.
- BREMNER, J.M. & MULVANEY, C.S. Nitrogen – Total. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R., eds. Methods of soil analysis, 2.ed. Part 2. Madison: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1982. p.595-624.
- COELHO, M.B., MATEOS, L. & VILLALOBOS, F.J. Influence of a compacted loam subsoil layer on growth and yield of irrigated cotton in Southern Spain. Soil Till. Res., 57:129-142, 2000.
- DIAS JÚNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.55-94.

- 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.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- HILLEL, D. Fundamentals of soil physics. Amherst, University of Massachusetts. Academic Press, 1980. 413p.
- ISHAQ, M., IBRAHIM, M., HASSAN, A., SAEED, M. & LAL, R. Subsoil compaction effects on crops Punjab, Pakistan: II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. *Soil Till. Res.*, 60:153-161, 2001.
- JOHNSON, C.M. & ULRICH, A. Analytical methods for use in plants analyses. 1959. p. 32-33, v.766. Los Angeles, University of California.
- JUNGK, A. Dynamics of nutrient movement at the soil-root interface. 1991. p. 455-481. *In*: WAISEL, J., ESHEL, A. & KAFKAFI, U. (eds.) *Plant Roots, The Hidden Half.* Marcel Dekker, New York.
- 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.
- 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.
- MEHLICH, A. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 9:477-492, 1978.
- MISRA, R.K. & GIBBONS, A.K. Growth and morphology of eucalypt seedling-roots, in relation to soil strength arising from compaction. *Plant Soil*, 182:1-11, 1996.
- 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. & SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.

- OBERHAUSER, A.G.; SILVA, S.R. & BARROS, N.F. Crescimento de eucalipto e densidade de dois Latossolos influenciados pela compactação do solo a diferentes umidades. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 25., Rio de Janeiro, 2002. Anais. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. (CD-ROOM)
- OLIVEIRA, C.V.; BAHIA, V.G. & PAULA, M.B. Compactação do solo devido à mecanização florestal: causas, efeitos e práticas de controle. Inf. Agropec., 191:46-48, 1998.
- 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.
- SILVA, S.R.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. & PEREIRA, P.R.G. Eficiência nutricional de potássio e crescimento de eucalipto influenciados pela compactação do solo. R. Bras. Ci. Solo, 26:1001-1010, 2002.
- SHIERLAW, J. & ALSTON, A.M. Effects of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. Plant Soil, 77:15-28, 1984.
- TENNANT, D.A. A test of a modified line intersect method of estimating root length. J. Ecol., 63:995-1001, 1975.
- YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 19:1467-1476, 1988.

EXPERIMENTO 5

COMPACTAÇÃO DO SOLO INFLUENCIADA PELA INTENSIDADE DE TRÂNSITO E CARGA DE UM FORWARDER

RESUMO

Durante a retirada de madeira de povoamentos florestais as máquinas trafegam numa mesma linha várias vezes, o que pode causar a compactação do solo e, como consequência, facilitar o processo erosivo e dificultar o crescimento de raízes. O grau de compactação, além do número de passadas da máquina, pode também ser afetado pelo peso de madeira transportado. Este trabalho teve como objetivo avaliar a compactação do solo de acordo com a intensidade de trânsito e a carga de madeira de um forwarder. O estudo foi conduzido no município de Santana do Paraíso, MG, em um Latossolo Amarelo (LA) caulínico. Um povoamento de eucalipto com 6 anos de idade foi abatido por motosserra, sendo a madeira retirada da área manualmente. Em seguida, demarcaram-se parcelas de quatro linhas com 26 árvores (espaçamento 3 x 2 m), totalizando área de 624 m² cada parcela. Dois ensaios foram conduzidos. No primeiro, testou-se o efeito da intensidade de trânsito, no qual um forwarder (modelo Valmet 636 S), com tara de 11,9 t, foi carregado com 8 m³ de madeira (densidade de 480 kg m⁻³) e dirigido sobre a mesma entrelinha por 0, 4, 8 e 12 vezes. No segundo, o forwarder recebeu cargas correspondentes a 0, 4, 8 e 12 m³ de madeira e dirigido quatro vezes sobre a mesma entrelinha. Em cada parcela, quatro entrelinhas foram compactadas pelas rodas. O teor de carbono orgânico era 2,68 e 2,40 dag kg⁻¹ e a umidade atual do solo era de 0,156 e 0,171 kg kg⁻¹, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade, respectivamente, e correspondia a 78 e 86 % do equivalente de umidade. O teor de argila é de 510 e de areia 450 g kg⁻¹. As avaliações realizadas após a aplicação dos tratamentos, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade, foram: densidade do solo e agregados estáveis em água. Determinou-se, ainda, a resistência à penetração até à profundidade de 60 cm, com o uso de um penetrômetro de impacto, e a percentagem da área superficial coberta com resíduos florestais, pelo método da corda. Verificou-se que o trânsito do forwarder aumentou a densidade e a resistência do solo à

penetração, reduziu a estabilidade de agregados em água e a cobertura do solo. A maior parte dos efeitos da compactação foi manifestada por apenas quatro passadas do forwarder, mesmo quando vazio.

Termos para indexação: Densidade do solo, agregados estáveis em água, resistência do solo à penetração

SUMMARY: Soil compaction as affected by forwarder load and traffic intensity

For timber exploitation from forested areas, the harvesting machines pass several times over a same track and may cause soil compaction leading to soil erosion and restricted tree root growth. The level of soil compaction depends on the number of passes and wood load. This paper aimed to evaluate soil compaction as affected by the number of a forwarder passes and eucalypt wood load. The study was carried out in Santana do Paraíso county, Minas Gerais State – Brazil, in a 6 year-old eucalypt stand growing on an Oxisol. The trees were felled by a chainsaw and removed from the area by hand. Then, plots of 624 m² (four rows with 26 trees in the 3 x 2 m spacing) were laid out and two trials conducted. In the first, was tested the number of passes of a forwarder, weighting 11.9 ton and with 8 m³ of wood (density of 480 kg m⁻³) load: no passes (wood removed by hand), 4, 8, and 12 passes. In the second trial, was tested forwarder load: 0, 4, 8, and 12 m³ of wood, driving the machine four times over the same track. In each plot, the passes affected four rows. The soil of the area is clayey (510 g kg⁻¹ clay) and its moisture content during the trial was 0.156 and 0.171 kg kg⁻¹, for the 0-10 cm and 10-20 cm depth, respectively. These layers were assessed for soil density and water-stable aggregates, and soil resistance to penetration to 60 cm depth. Soil surface coverage by slash was also evaluated. Forwarder traffic increased soil compaction and resistance to penetration and reduced aggregate stability and soil coverage. The disturbances were strong even with four passes of the unloaded forwarder.

Index terms: Soil bulk density, water-stable aggregates, soil penetration resistance

INTRODUÇÃO

O constante e significativo aumento do peso dos veículos agrícolas e florestais, registrado nas últimas décadas, preocupa pelas conseqüências a longo prazo sobre a produtividade dos solos transitados, com implicações na conservação desses recursos naturais. Devido a isto, o potencial de prejuízos à produtividade florestal é grande, já que essa operação se repete em forma recorrente (Balbuena et al., 2000).

Durante a retirada de madeira as máquinas trafegam numa mesma linha várias vezes, podendo causar danos à estrutura do solo, facilitando o processo erosivo e dificultando o crescimento radicular, com conseqüente redução no rendimento tanto no primeiro ano de produção, como nos anos posteriores (Jorajuria et al., 1997; Lal, 1996; Håkansson & Reeder, 1994). O grau de compactação, além do número de passadas, pode também ser afetado pelo peso de madeira transportado, sendo que, a deformação ocorrerá quando as pressões aplicadas ao solo excederem à sua capacidade de suporte de carga (Dias Júnior, 2000).

A compactação causa mudanças desfavoráveis na densidade, porosidade, permeabilidade e resistência do solo à penetração (Ishaq et al., 2001a; Alakukku & Elonen, 1994). A resistência à penetração aumenta com a compactação do solo, sendo restritiva ao crescimento radicular acima de certos valores que variam de 1,5 a 3,0 MPa, conforme Grant & Lafond (1993), e de 2,0 a 4,0 MPa, segundo Oussible et al. (1992) e Arshad et al. (1996).

Jakobsen & Greacen (1985), estudando a compactação causada por forwarder em solos com plantio de pinus, observaram que os valores de resistência do solo à penetração eram acrescidos de 0,2 a 0,3 MPa a cada passada da máquina e que a densidade do solo aumentava e a condutividade hidráulica diminuía com o número de passadas.

A importância da estabilidade de agregados na manutenção de propriedades físicas do solo frente a fatores adversos, como a colheita e o cultivo mecanizados, tem despertado o interesse de vários pesquisadores (Levy & Miller, 1997; Unger, 1995), uma vez que ela correlaciona-se bem com a permeabilidade e a resistência do solo à erosão hídrica.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a compactação do solo de acordo com a intensidade de trânsito e a carga de madeira de um forwarder.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido no município de Santana do Paraíso, MG (19° 22' 58" S e 42° 28' 56" W), em um Latossolo Amarelo (LA) caulínítico. Um povoamento de eucalipto com 6 anos de idade foi abatido por motosserra, sendo a madeira retirada da área manualmente. Em seguida, demarcaram-se parcelas de quatro linhas com 26 árvores (espaçamento 3 x 2 m) com área de 624 m² cada. Dois ensaios foram conduzidos. No primeiro, testou-se o efeito da intensidade de trânsito, no qual um trator florestal autocarregável (forwarder, marca Valmet, modelo 636 S), com tara de 11,9 t, foi carregado com 8 m³ de madeira (densidade de 480 kg m⁻³) e dirigido sobre a mesma entrelinha por 0, 4, 8 e 12 vezes. No segundo, o forwarder recebeu cargas correspondentes a 0, 4, 8 e 12 m³ de madeira e dirigido quatro vezes sobre a mesma entrelinha. Em cada parcela, quatro entrelinhas foram compactadas pelas rodas. O teor de carbono orgânico era 2,68 e 2,40 dag kg⁻¹ e a umidade atual do solo era de 0,156 e 0,171 kg kg⁻¹ nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade, respectivamente, e correspondia a 78 e 86 % do equivalente de umidade. O teor de argila é de 510 e de areia 450 g kg⁻¹.

As avaliações realizadas nas trilhas do forwarder, após a aplicação dos tratamentos, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm de profundidade, foram: densidade do solo (3 repetições) e agregados estáveis em água (quatro repetições) (EMBRAPA, 1997), sendo obtido o diâmetro médio geométrico segundo Kemper & Rosenau (1986). Determinou-se, ainda, a resistência à penetração (quatro repetições) até à profundidade de 60 cm, com o uso de um penetrômetro de impacto (modelo IAA/PLANALSUCAR – STOLF; Stolf et al., 1983), e a percentagem da área superficial coberta com resíduos florestais, após uma chuva de 56 mm, ocorrida no dia seguinte à instalação do experimento, pelo método da corda (Olszewski et al., 1998). Este método consistiu no uso de uma corda com comprimento de 10 m e marcada a cada 25 cm (ou 1 ponto) com uma cor que contrastou com a corda e com a área a ser avaliada. A corda foi estendida sobre as trilhas, em três posições aleatórias em cada parcela, e a avaliação da cobertura foi feita com a contagem de: área coberta por resíduos vegetais ou solo exposto. Os dados foram submetidos a análise de variância e as médias foram comparadas pelo teste de agrupamento Scott-Knott ($p < 0,05$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve aumento de aproximadamente 15 % da densidade do solo devido a compactação ocasionada por quatro passadas do forwarder, mas não houve diferença ($p > 0,05$) entre os valores de densidade obtidos com 4, 8 e 12 passadas (Figura 1). Esse comportamento foi similar nas duas camadas de solo estudadas. Jorajuria & Draghi (2000) relataram que 90 % do incremento máximo medido para a densidade aparente na camada superficial (0-30 cm), foram produzidos já na primeira passada de um trator leve. Segundo Taylor et al. (1982), a primeira passada é considerada como aquela que induz as maiores mudanças na estrutura do solo, o que se restringe a condições de solos recém lavrados. No entanto, quando o solo se encontra consolidado o grau de compactação pode ser similar para as distintas passadas. Também não foi verificado efeito do aumento da carga sobre a densidade do solo, e os valores obtidos com o forwarder com 12 m³ de madeira foram estatisticamente iguais àqueles obtidos com a máquina vazia (Figura 1). O acréscimo da carga não aumenta, necessariamente, a compactação, pois ocorre aumento da superfície de contato pneu/solo, resultando na redistribuição da carga no solo (Greacen & Sands, 1980).

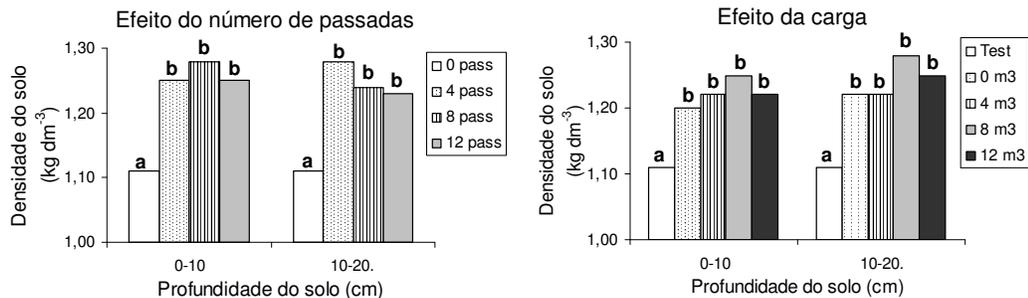


Figura 1. Densidade do solo resultante do número de passadas e carga do forwarder em povoamento de eucalipto, num Latossolo Amarelo caulinitico.

Koger et al. (1985) constataram que a maior parte da compactação total ocasionada pelo trânsito de um skidder ocorria nas primeiras passadas da máquina. Seixas & Souza (1998) observaram que cerca de 80 % da compactação total do solo, ocorrida após 20 passadas de um trator mais carreta carregada de madeira, resultaram das cinco primeiras viagens deste equipamento, não havendo incremento devido ao trânsito subsequente.

Houve redução dos agregados pertencentes à classe 4,75-2 mm de diâmetro em decorrência do trânsito do forwarder (Quadro 1). Esta redução foi, em média, 11,5 e 25,2 % nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm, respectivamente, isto é, aproximadamente 2,2 vezes menor na camada superficial do solo. Isto proporcionou, na maioria das vezes, o aumento dos agregados nas demais classes, especialmente na profundidade de 10-20 cm. Em virtude desta redistribuição dos agregados entre classes de tamanho, observou-se que maiores incrementos ocorreram nas classes 2-1 e < 0,5 mm, respectivamente, nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm, indicando, portanto, maior desagregação do solo da camada subsuperficial. Não houve, de forma semelhante à densidade do solo, diferença entre os valores de agregados, nas respectivas classes, obtidos nos tratamentos com diferentes números de passadas (4, 8 e 12) e também entre os tratamentos com cargas variadas (0, 4, 8 e 12 m³ de madeira). Nota-se, ainda, a maior percentagem de agregados maiores (4,75-2 mm de diâmetro) na profundidade de 0-10 cm, o que pode ser atribuído ao maior teor de carbono orgânico (2,68 dag kg⁻¹) nesta camada em relação àquela de 10-20 cm (2,40 dag kg⁻¹), que associado à presença de raízes e maior atividade microbiana, proporcionam maior efeito agregante do solo na camada superficial.

Em decorrência da redistribuição dos agregados entre classes de tamanho, em resposta à compactação do solo, ocorreu decréscimo significativo de até 19,7 % do diâmetro médio geométrico (DMG) de agregados estáveis em água da camada de 10-20 cm de profundidade (Quadro 1). No entanto, na camada de 0-10 cm não foi constatada diferença ($p > 0,05$) entre os tratamentos. Esse fato pode ser atribuído ao maior teor de matéria orgânica na camada superficial do solo, pois, segundo Tisdall & Oades (1982), ela atua no aumento da estabilidade de agregados devido ao seu efeito de agregação dos constituintes minerais do solo. Campos et al. (1995) encontraram correlação positiva ($r = 0,85$) entre DMG dos agregados e teor de matéria orgânica. Os agregados estáveis em água indicam indiretamente a qualidade estrutural do solo (Silva et al., 2000) e sua susceptibilidade à erosão hídrica. Por isso, a matéria orgânica aumenta a resistência do solo aos efeitos deletérios da compactação em sistemas mecanizados de colheita florestal. Não houve diferença entre os valores de DMG obtidos nos tratamentos com 4, 8 e 12

passadas, bem como entre os tratamentos com cargas variadas (0, 4, 8 e 12 m³ de madeira).

Quadro 1. Distribuição do tamanho e diâmetro médio geométrico (DMG) de agregados estáveis em água afetados pelo número de passadas e carga do forwarder em povoamento de eucalipto em Latossolo Amarelo caulínítico

Tratamento	Profundidade: 0-10 cm					Profundidade: 10-20 cm						
	4,75- 2 mm	2 1 m	- 0,5 mm	1- 0,5 mm	<0,5 mm	DMG	4,75- 2 mm	2 1 m	- 0,5 mm	1- 0,5 mm	<0,5 mm	DMG
	-----%-----					mm	-----%-----					mm
Efeito do número de passadas												
0 pass	91,8 a	5,5 b	1,0 a	1,7 a	1,61 a	88,2 a	6,5 b	2,0 b	3,3 b	1,57 a		
4 pass	77,4 b	10,6 a	4,1 a	7,9 a	1,43 a	68,7 b	11,1 a	6,8 a	13,4 a	1,32 b		
8 pass	80,4 b	10,7 a	3,9 a	5,0 a	1,49 a	64,1 b	14,6 a	7,2 a	14,1 a	1,29 b		
12 pass	82,8 b	10,5 a	2,4 a	4,3 a	1,52 a	62,7 b	14,6 a	9,6 a	13,1 a	1,28 b		
Efeito da carga												
Test	91,8 a	5,5 b	1,0 a	1,7 a	1,61 a	88,2 a	6,5 b	2,0 b	3,3 b	1,57 a		
0 m ³	82,7 a	10,2 a	2,5 a	4,6 a	1,51 a	66,0 b	12,5 a	8,8 a	12,7 a	1,31 b		
4 m ³	81,8 a	8,4 a	3,9 a	5,9 a	1,49 a	69,9 b	13,2 a	5,6 a	11,3 a	1,36 b		
8 m ³	77,4 a	10,6 a	4,1 a	7,9 a	1,43 a	68,7 b	11,1 a	6,8 a	13,4 a	1,32 b		
12 m ³	86,0 a	8,4 a	2,4 a	3,2 a	1,54 a	61,3 b	14,1 a	9,4 a	15,2 a	1,26 b		

Valores seguidos pela mesma letra na coluna, individualmente para cada ensaio e para cada profundidade, não diferem entre si ($\alpha = 0,05$).

A resistência do solo à penetração (RP) aumentou com o número de passadas (Figura 2), como também verificado em outros trabalhos (Marsili et al., 1998; Marsili & Servadio, 1996). É interessante observar que esse efeito localizou-se especialmente na camada de 5-25 cm de profundidade, a exemplo do que foi obtido por Nugent et al. (2003), que verificaram maior aumento da RP pelo trânsito de um forwarder, na profundidade de 10-30 cm. A passagem do implemento na mesma entrelinha 4, 8 e 12 vezes, ocasionou aumentos da RP, a 10 cm de profundidade, de 5,6; 4,7 e 7,5 vezes, respectivamente, em

relação à testemunha não compactada (0 passada). Resultados semelhantes foram obtidos por Balbuena et al. (2000), que relataram serem os aumentos na RP mais importantes na superfície (nos primeiros 40 cm de profundidade), sendo incrementados com o acréscimo do número de passagens do trator. Houve, também, aumento de 5,6 vezes na RP no tratamento 8 m³ de carga, nessa mesma profundidade, em relação à testemunha, embora não tenha ocorrido grande variação entre os valores obtidos nas quatro cargas utilizadas. Na profundidade de 25-60 cm não houve diferença entre os tratamentos compactados e a testemunha.

Os valores máximos de RP foram de 8,65 e 6,46 MPa, respectivamente, nos ensaios de intensidade de trânsito e carga, sendo consideravelmente maiores que 2,87 MPa obtidos por Fernandes & Souza (2003) nas trilhas, depois da passada do forwarder. No entanto, sabe-se que a umidade do solo durante esta avaliação altera muito estes resultados, sendo que, em solos mais úmidos a RP é menor. É importante destacar que qualquer resistência superior a 2 MPa pode reduzir o crescimento e desenvolvimento radicular (Ishaq et al., 2001b; Martino & Shaykewich, 1994; Oussible et al., 1992).

Neste trabalho, a camada de 5-25 cm foi a melhor para avaliação da compactação do solo por meio do uso de penetrômetro. De acordo com Raper & Erbach (1990), para um dado solo, a distribuição da compactação no perfil é função da carga aplicada, da pressão exercida pelo rodado, da umidade do solo e da intensidade de trânsito recebida.

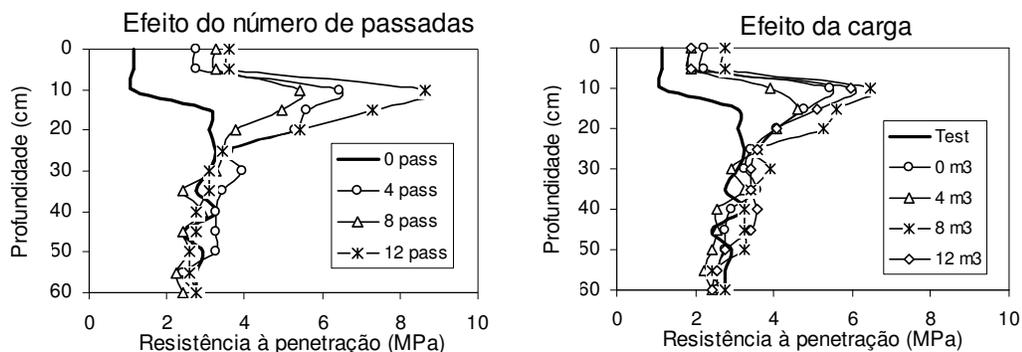


Figura 2. Resistência do solo à penetração de acordo com o número de passadas e carga do forwarder em povoamento de eucalipto, num Latossolo Amarelo caulínítico.

O trânsito do forwarder modificou as características do solo, tendo como consequência a redução da cobertura de resíduos vegetais nas trilhas dos pneus, após uma chuva de 56 mm ocorrida no dia seguinte à instalação do experimento (Figura 3). Esta redução foi devido ao efeito dilacerante dos pneus sobre a serapilheira e à redução da infiltração de água no solo, resultando em aumento do escoamento superficial e consequente erosão hídrica, favorecidos pela declividade do terreno (17°), como observado *in situ*. O aumento do número de passadas proporcionou redução de até 51,7 % (12 passadas) da cobertura vegetal do solo. No entanto, não houve diferença entre os valores obtidos nos tratamentos de carga (0, 4, 8 e 12 m³). Dessa forma, embora o número de passadas e a carga do forwarder tenham pouco efeito na densidade do solo e no tamanho de agregados, o maior número de passadas resulta em maior predisposição do solo à erosão hídrica.

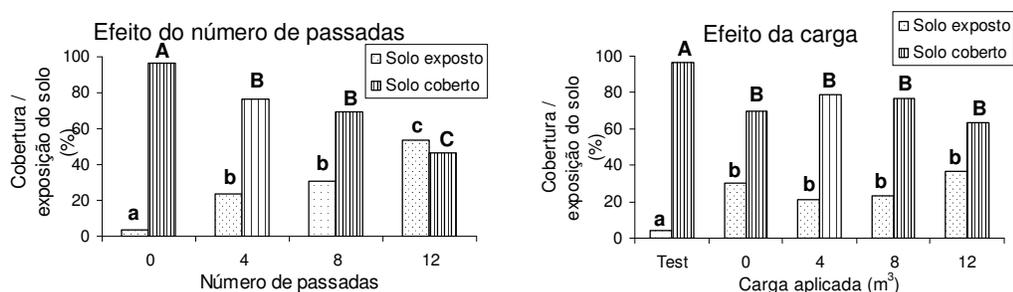


Figura 3. Cobertura do solo relacionada ao número de passadas e carga do forwarder em povoamento de eucalipto, num Latossolo Amarelo caulinitico.

CONCLUSÕES

1. O trânsito do forwarder aumentou a densidade e a resistência do solo à penetração, reduziu a estabilidade de agregados em água e a cobertura do solo;
2. A maior parte dos efeitos da compactação foi manifestada por apenas quatro passadas do forwarder, mesmo quando vazio;
3. A camada de solo recomendada para avaliações da compactação pelo uso de penetrômetro é de 5-25 cm de profundidade.

LITERATURA CITADA

- ALAKUKKU, L. & ELONEN, P. Finish experiment on subsoil compaction by vehicles with high axle load. *Soil Till. Res.*, 29:151-155, 1994.
- ARSHAD, M.A.; LOWERY, B. & GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., eds. *Methods for assessing soil quality*. Madison, Soil Science Society of America. 1996. p. 123-141 (SSSA Special publication 49).
- BALBUENA, R.H.; TERMINIELLO, A.M.; CLAVERIE, J.A.; CASADO, J.P. & MARLATS, R. Compactación del suelo durante la cosecha forestal. Evolución de las propiedades físicas. *R. Bras. Eng. Agric. Ambient.*, 4:453-459, 2000.
- CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J. & PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 19:121-126, 1995.
- DIAS JÚNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.55-94.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- FERNANDES, H.C. & SOUZA, A.P. Compactação de um Latossolo Vermelho causada pelo tráfego do "Forwarder". *R. Árvore*, 27:279-284, 2003.
- GRANT, C.A. & LAFOND, G.P. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in southern Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.*, 73:223-232, 1993.
- GREACEN, E.L. & SANDS, R. Compaction of forest soils: a review. *Aust. J. Soil Res.*, 18:163-89, 1980.
- HÅKANSSON, I. & REEDER, R.C. Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response. *Soil Till. Res.*, 29:277-304, 1994.
- ISHAQ, M.; HASSAN, A.; SAEED, M.; IBRAHIM, M. & LAL, R. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan. I. Soil physical properties and crop yield. *Soil Till. Res.*, 59:57-65, 2001a.
- ISHAQ, M.; HASSAN, A.; SAEED, M.; IBRAHIM, M. & LAL, R. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan. II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. *Soil Till. Res.*, 60:153-161, 2001b.

- JAKOBSEN, B.F. & GREACEN, E.L. Compaction of sandy forest soils by Forwarder operations. *Soil Till. Res.*, 5:55-70, 1985.
- JORAJURIA, D. & DRAGHI, L. Sobrecompactación del suelo agrícola. Parte I: Influencia diferencial del peso y del número de pasadas. *R. Bras. Eng. Agric. Ambient.*, 4:445-452, 2000.
- JORAJURIA, D.; DRAGHI, L. & ARAGON, A. The effect of vehicle weight on the distribution of compaction with depth and the yield of *Lolium/Trifolium* grassland. *Soil Till. Res.*, 41:1-12, 1997.
- KEMPER, W.D. & ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis. Part 1 – Physical and mineralogical methods. SSSA book series, 2^a ed.*, 1986. p.425-442.
- KOGER, J.L.; BURT, E.C. & TROUSE, A.C. Multiple pass effects of skidder tires on soil compaction. *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs.*, 28:11-16, 1985.
- LAL, R. Axle load and tillage effects on crop yields on a Mollic Ochraqualf in northwest Ohio. *Soil Till. Res.*, 37:143-160, 1996.
- LEVY, G.J. & MILLER, W.P. Aggregate stabilities of some southeastern U.S. soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:1176-1182, 1997.
- MARSILI, A. & SERVADIO, P. Compaction effects of rubber or metal-tracked tractor passes on agricultural soils. *Soil Till. Res.*, 37:37-45, 1996.
- MARSILI, A.; SERVADIO, P.; PAGLIAI, M. & VIGNOZZI, N. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber – and metal-tracked tractors. *Soil Till. Res.*, 49:185-199, 1998.
- MARTINO, D.L. & SHAYKEWICH, C.F. Root penetration profiles of wheat and barley as affected by soil penetration resistance in field conditions. *Can. J. Soil Sci.*, 74:193-200, 1994.
- NUGENT, C.; KANALI, C.; OWENDE, P.M.O.; NIEUWENHUIS, M. & WARD, S. Characteristic site disturbance due to harvesting and extraction machinery traffic on sensitive forest sites with peat soils. *For. Ecol. Manage.*, 180:85-98, 2003.
- OLSZEWSKI, N.; BRAGA, A.P.; COSTA, L.M. & SILVA, H.R.F. Proposição de metodologia para avaliação de degradação de pastagens em propriedades rurais. In: *Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água. Resumos Expandidos. Fortaleza, 1998.*
- OUSSIBLE, M.; CROOKSTON, P.K. & LARSON, W.E. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat. *Agron. J.*, 84:34-38, 1992.

- RAPER, R. & ERBACH, D. Prediction of soil stresses using the finite element method. *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs.*, 33:725-730, 1990.
- SEIXAS, F. & SOUZA, C.R.S. The use of bulk density and cone penetrometer resistance as indicators to evaluate the influence of forestry machine traffic on soil compaction. In: IUFRO CONFERENCE ON INDICATORS FOR SUSTAINABLE FOREST MANAGEMENT, Melbourne, 1998. Proceedings. Melbourne: Natural Resources and Environment, 1998. p.156-157.
- SILVA, M.L.N.; CURI, N. & BLANCANEUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. *Pesq. Agrop. Bras.*, 35:2485-2492, 2000.
- STOLF, R.; FERNANDES, J. & FURLANI NETO, V.L. Recomendações para o uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSUCAR – STOLF. Série Penetrômetro de Impacto, p. 1-9. 1983. (Boletim Técnico, 1)
- TAYLOR, J.; BURT, E. & BAILEY, N. Multipass behavior of a pneumatic tyre in tilled soils. ASAE Paper N° 79-1549, St. Joseph, MI, 1982.
- TISDALL, J.M. & OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.*, 33:141-163, 1982.
- UNGER, P.W. Organic matter and water-stable aggregate distribution in ridge-tilled surface soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:1141-1145, 1995.

EXPERIMENTO 6

COMPACTAÇÃO DO SOLO E CRESCIMENTO DE EUCALIPTO EM RESPOSTA A INTENSIDADE DE TRÂNSITO E CARGA DE UM FORWARDER

RESUMO

Em povoamentos florestais, durante a retirada de madeira, as máquinas trafegam numa mesma linha várias vezes, o que pode causar a compactação do solo e, como consequência, facilitar o processo erosivo e dificultar o crescimento de raízes. O grau de compactação, além do número de passadas da máquina, pode também ser afetado pelo peso de madeira transportado. Este trabalho teve como objetivo avaliar a compactação do solo e o crescimento de eucalipto de acordo com a intensidade de trânsito e a carga de madeira de um forwarder. O estudo foi conduzido no município de Santa Maria de Itabira, MG, em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) oxidico-gibbsítico. Um povoamento de eucalipto com 7 anos de idade foi abatido por motosserra, sendo a madeira retirada da área manualmente. Em seguida, demarcaram-se parcelas de quatro linhas de árvores com 26 árvores (espaçamento 3 x 2 m), com área de 624 m² cada. Dois ensaios foram conduzidos. No primeiro, testou-se o efeito da intensidade de trânsito, no qual um forwarder, com tara de 11,9 t, foi carregado com 12 m³ de madeira (densidade de 480 kg m⁻³) e dirigido sobre a mesma entrelinha por 0, 2, 4 e 8 vezes. No segundo, o forwarder recebeu cargas correspondentes a 4, 8 e 12 m³ de madeira e dirigido quatro vezes sobre a mesma entrelinha. Em cada parcela, quatro entrelinhas foram compactadas pelas rodas. Foi realizado o plantio de eucalipto em covas de 30 x 30 x 30 cm abertas sobre as trilhas compactadas. O teor de carbono orgânico total era de 4,06 e 2,72 dag kg⁻¹ e a umidade atual do solo era de 0,248 e 0,249 kg kg⁻¹ nas camadas de 0-5 e 5-10 cm de profundidade, respectivamente. O teor de argila é de 470 e de areia 440 g kg⁻¹. As avaliações realizadas após a aplicação dos tratamentos, nas camadas de 0-5 e 5-10 cm de profundidade, foram: densidade do solo e agregados estáveis em água. Determinou-se, ainda, a velocidade de infiltração básica (VIB) pelo método do infiltrômetro de cilindro. Após 441 dias estas

mensurações foram realizadas novamente, sendo acrescentadas de novas análises: CO total, N total, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, porosidade e resistência à penetração. Nas plantas foram mensuradas altura, diâmetro à altura do peito e matéria seca de tronco. Verificou-se que o trânsito do forwarder aumentou a densidade, microporosidade e a resistência do solo à penetração; reduziu a estabilidade de agregados em água, porosidade total, macroporosidade e a infiltração de água no solo. Não houve efeito da compactação sobre a produção de matéria seca de tronco e altura das plantas. A maior parte dos efeitos da compactação foi manifestada por apenas duas passadas do forwarder. Os efeitos da compactação permaneceram no solo após 441 dias do trânsito do forwarder.

Termos para indexação: Densidade do solo, agregados estáveis em água, resistência do solo à penetração, porosidade, carbono orgânico, infiltração.

SUMMARY: Soil compaction and eucalyptus growth as affected by forwarder load and traffic intensity

During timber exploitation from forested areas the harvesting machines pass several times over a same track and may cause soil compaction leading to soil erosion and restricted tree root growth. The level of soil compaction depends on the number of passes and wood load. This paper aimed to evaluate soil compaction and eucalyptus growth as affected by the number of a forwarder passes and eucalypt wood load. The study was carried out in Santa Maria de Itabira county, Minas Gerais State – Brazil, in a 7 year-old eucalypt stand planted on an Oxisol. The trees were felled by a chainsaw and removed from the area by hand. Then, plots of 624 m² (four rows with 26 trees in the 3 x 2 m spacing) were laid out and two trials conducted. In the first, was tested the number of passes of a forwarder, weighting 11.9 ton and with 12 m³ of wood (density of 480 kg m⁻³) load: no passes (wood removed by hand), 2, 4, and 8 passes. In the second trial, was tested forwarder load: 4, 8, and 12 m³ of wood, driving the machine four times over the same track. In each plot, the passes affected four rows. Eucalyptus was planted in 30 x 30 x 30 cm holes across compacted tracks. The soil of the area is clayey (470 g kg⁻¹ clay), the soil organic carbon was 4.06 and 2.72 dag kg⁻¹ and its moisture content during the trial was 0.248 and 0.249 kg kg⁻¹, for the 0-5 cm and 5-10 cm depth,

respectively. These layers were assessed for soil bulk density, and water-stable aggregates. The infiltration rate were measured by means of cylinder infiltrometer. After 441 days these measurements were accomplished again, and added with these analysis: soil organic carbon, total nitrogen, $N-NH_4^+$, $N-NO_3^-$, porosity and penetration resistance. The height, steam diameter and dry matter of steam were measured in plants. Forwarder traffic increased soil compaction, resistance to penetration and microporosity; and reduced aggregate stability, total porosity, macroporosity and infiltration rate. Soil compaction not affected the yield dry matter of stem and heigth of plants. The disturbances were strong even with two passes of forwarder. The compaction effects remain along 441 days of forwarder traffic.

Index terms: Soil bulk density, water-stable aggregates, soil penetration resistance, porosity, soil organic carbon, infiltration.

INTRODUÇÃO

O constante e significativo aumento do peso dos veículos agrícolas e florestais, registrado nas últimas décadas, preocupa pelas conseqüências a longo prazo sobre a produtividade do eucalipto em solos transitados, cujo potencial de prejuízos à produtividade florestal é grande, já que essa operação se repete em forma recorrente (Balbuena et al., 2000). O trânsito de máquinas no terreno é reconhecido como uma das principais fontes de compactação. Como conseqüência da mesma, o crescimento das árvores é prejudicado (Wert & Thomas, 1981; Froehlich et al., 1985; Startsev & McNabb, 2000).

O trânsito repetido em uma mesma área intensifica os danos à estrutura do solo com conseqüente redução do rendimento das culturas tanto no primeiro ano de produção, como nos anos posteriores (Håkansson & Reeder, 1994; Lal, 1996; Jorajuria et al., 1997). Durante a retirada de madeira de povoamentos florestais as máquinas trafegam numa mesma linha várias vezes, o que pode causar a compactação do solo e, como conseqüência, dificultar o crescimento de raízes. Por exemplo, em um sistema de colheita cujo forwarder apresentou alto risco de ocasionar compactação, concluiu-se que o controle do número de passadas das máquinas pode reduzir os impactos sobre o solo ocasionados pela compactação (Nugent et al., 2003). O grau de compactação, além do número de passadas, pode também ser afetado pelo

peso da madeira transportada, sendo que, a deformação ocorrerá quando as pressões aplicadas ao solo excederem à sua capacidade de suporte de carga.

A compactação influi nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, sendo uma importante causa de degradação de solos agrícolas no mundo (Hakansson et al., 1988; Hakansson & Voorhees, 1998). Ela pode afetar a ciclagem de C e N pela mudança da aeração do solo ou da comunidade microbiana, podendo retardar a decomposição da matéria orgânica e aumentar as perdas gasosas de N (Breland & Hansen, 1996; Jensen et al., 1996).

A compactação aumenta a densidade e a resistência do solo à penetração, e reduz a macroporosidade, aeração, infiltração e armazenamento de água no solo (Alakukku & Elonen, 1994; Panayiotopoulos et al., 1994; Ishaq et al., 2001a; Silva, 2005). A redução da infiltração de água no solo, decorrente da compactação da camada superficial, pode resultar em aumento do escoamento superficial e erosão (Kayombo & Lal, 1994). O aumento da resistência do solo à penetração, pode ser restritivo ao crescimento radicular acima de certos valores que variam de 1,5 a 3,0 MPa, conforme Grant & Lafond (1993), e de 2,0 a 4,0 MPa, segundo Oussible et al. (1992) e Arshad et al. (1996). Jakobsen & Greacen (1985), estudando a compactação causada por forwarder em áreas de pinus, observaram que os valores de resistência do solo à penetração eram acrescidos de 0,2 a 0,3 MPa a cada passada da máquina.

A importância da estabilidade de agregados na manutenção de propriedades físicas do solo frente a fatores adversos, como a compactação ocasionada pela colheita e cultivo mecanizados, tem despertado o interesse de vários pesquisadores (Unger, 1995; Levy & Miller, 1997), uma vez que ela correlaciona-se com a permeabilidade e a resistência do solo à erosão hídrica.

A persistência da compactação do solo causada pelo trânsito de máquinas tem sido relatada por vários pesquisadores (Black et al., 1976; Pollard & Elliott, 1978; Voorhees et al., 1978; Logsdon et al., 1992; Lal, 1996). Alguns desses estudos mostraram que os efeitos da compactação são apenas temporariamente prejudiciais; todavia, na maioria dos casos, pouca ou nenhuma modificação da compactação foi observada.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a compactação do solo e o crescimento de eucalipto de acordo com a intensidade de trânsito e a carga de madeira de um forwarder.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido no município de Santa Maria de Itabira, MG (19° 23' 58" S e 42° 54' 12" W; altitude de 1273 m), em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) oxidico-gibbsitico (Quadro 1). Um povoamento de eucalipto com 7 anos de idade foi abatido por motosserra, sendo a madeira retirada da área manualmente. Em seguida, demarcaram-se parcelas de quatro linhas com 26 árvores (espaçamento 3 x 2 m) com área de 624 m² cada. Dois ensaios foram conduzidos. No primeiro, testou-se o efeito da intensidade de trânsito, no qual um trator florestal autocarregável (forwarder, marca Valmet, modelo 636 S), com tara de 11,9 t, foi carregado com 12 m³ de madeira (densidade de 480 kg m⁻³) e dirigido sobre a mesma entrelinha por 0, 2, 4 e 8 vezes. No segundo, o forwarder recebeu cargas correspondentes a 4, 8 e 12 m³ de madeira e dirigido quatro vezes sobre a mesma entrelinha. Em cada parcela, quatro entrelinhas foram compactadas pelas rodas. A umidade atual do solo era 0,248 e 0,249 kg kg⁻¹ nas camadas de 0-5 e 5-10 cm de profundidade, respectivamente, e correspondia a 124 e 124,5 % do equivalente de umidade. Cinco semanas após a aplicação destes tratamentos foi realizado o plantio de *Eucalyptus grandis* em covas de 30 x 30 x 30 cm abertas sobre as trilhas compactadas pelas rodas do forwarder.

Quadro 1. Caracterização do solo utilizado no experimento

Característica	0-5 cm	5-10 cm
COT (dag kg ⁻¹) ⁽¹⁾	4,06	2,72
Equivalente de umidade (kg kg ⁻¹)	0,2	0,2
Densidade do solo (kg dm ⁻³)	0,94	0,97
Argila (g kg ⁻¹)	470	470
Silte (g kg ⁻¹)	90	90
Areia (g kg ⁻¹)	440	440
Classe textural	Argila	Argila

⁽¹⁾ Carbono orgânico total (Walkley & Black, 1934).

As avaliações realizadas no tempo inicial (T₀), após a aplicação dos tratamentos, foram: densidade do solo pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997); velocidade de infiltração básica (VIB) pelo método do infiltrômetro de cilindro (Cerdà, 1996); e agregados estáveis em água

(EMBRAPA, 1997), sendo obtido o diâmetro médio geométrico segundo Kemper & Rosenau (1986). Estas avaliações foram realizadas ao acaso, com 5 repetições, em amostras de solo retiradas nas trilhas do forwarder, nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm (com exceção da VIB).

Após 441 dias (T_{441}) estas mensurações foram realizadas novamente (6 repetições) em amostras de solo coletadas no ponto médio entre duas covas, nas trilhas compactadas, sendo acrescentadas de novas análises: CO total, N total, $N-NH_4^+$, $N-NO_3^-$. O CO total foi obtido pela oxidação da matéria orgânica via úmida com dicromato de potássio em meio sulfúrico (Walkley & Black, 1934); o N total foi obtido por oxidação úmida e determinado pelo método Kjeldahl (Bremner & Mulvaney, 1982); o N mineral ($N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$) foi extraído com solução de KCl 1 mol L^{-1} (10 g solo:50 mL) por 10 min. Foram utilizados métodos colorimétricos para a determinação de $N-NO_3^-$ (Yang et al., 1998) e $N-NH_4^+$ (Kempers & Zweers, 1986). Foram retiradas amostras indeformadas nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm, por meio de tubos de PVC de 97,6 cm^3 . Nestas amostras foi mensurada a microporosidade pelo método da mesa de tensão, e calculadas a porosidade total e a macroporosidade (EMBRAPA, 1997). Após equilíbrio da umidade do solo a uma tensão de 0,006 MPa na mesa de tensão, foi medida a resistência do solo à penetração utilizando um penetrômetro eletrônico com velocidade constante de penetração de 4 $cm\ min^{-1}$ e um cone com diâmetro de base de 4 mm e semi-ângulo de 30°. O penetrômetro estava equipado com um atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplado a um microcomputador para aquisição dos dados. No centro geométrico de cada amostra, na profundidade de 5 a 45 mm, uma leitura de resistência foi obtida a cada 0,5 mm, perfazendo um total de 80 leituras, as quais foram utilizadas para calcular a média da resistência do solo à penetração de cada amostra.

Após 406 dias do plantio foram mensuradas nas árvores a altura, o diâmetro na altura do peito (DAP) e matéria seca do tronco. Para tanto, todas as árvores de cada tratamento foram mensuradas (DAP) e escolhidas as três mais representativas para serem abatidas e avaliadas.

Os valores de precipitação mensal durante a condução do experimento encontram-se na Figura 1.

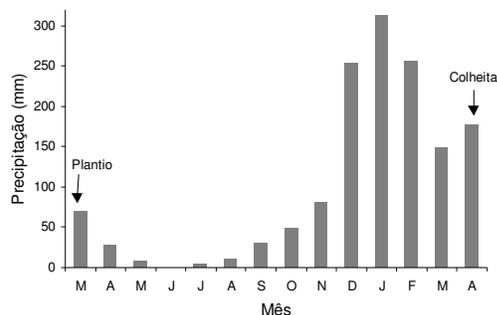


Figura 1. Precipitação mensal durante a condução do experimento em povoamento de eucalipto.

No experimento de número de passadas os dados foram submetidos à análise de variância, de correlação e de regressão, sendo os coeficientes das equações ajustadas testados com base no quadrado médio do resíduo da ANOVA do experimento. Entre os modelos significativos, foi escolhido aquele que apresentou maior coeficiente de determinação (R^2). No experimento de carga os dados foram submetidos à análise de variância e de correlação e as médias foram comparadas pelo teste de agrupamento Scott-Knott ($p < 0,05$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve aumento da densidade do solo (D_s) ocasionada pelo trânsito do forwarder (Figura 2). O incremento da D_s atingiu 29 e 32 % logo após 8 passadas do forwarder, respectivamente, nas camadas de 0-5 e 5-10 cm de profundidade. Já na 2ª coleta, após 441 dias, houve uma recuperação na estrutura do solo e, o incremento alcançou 15 e 24 % nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, respectivamente. Verificou-se que 51 % (0-5 cm) e 73 % (5-10 cm) do incremento da D_s , mensurada após a compactação do solo, permaneceram após 441 dias, demonstrando que a camada superficial possui maior resiliência ou capacidade de retornar ao estado inicial após compactada, o que pode ser atribuído ao maior número de ciclos de umedecimento e secagem e ao maior teor de matéria orgânica nesta camada de 0-5 cm em relação à de 5-10 cm de profundidade.

Os resultados do estudo conduzido por Ishaq et al. (2001a) mostraram que os efeitos da compactação sobre a densidade e resistência à penetração do solo persistiram por mais de 2 anos. Resultados similares foram obtidos por Voorhees et al. (1986) e Hammel (1994), cujos acréscimos na densidade e, ou,

na resistência à penetração permaneceram por 4 e 3 anos, respectivamente, após a compactação.

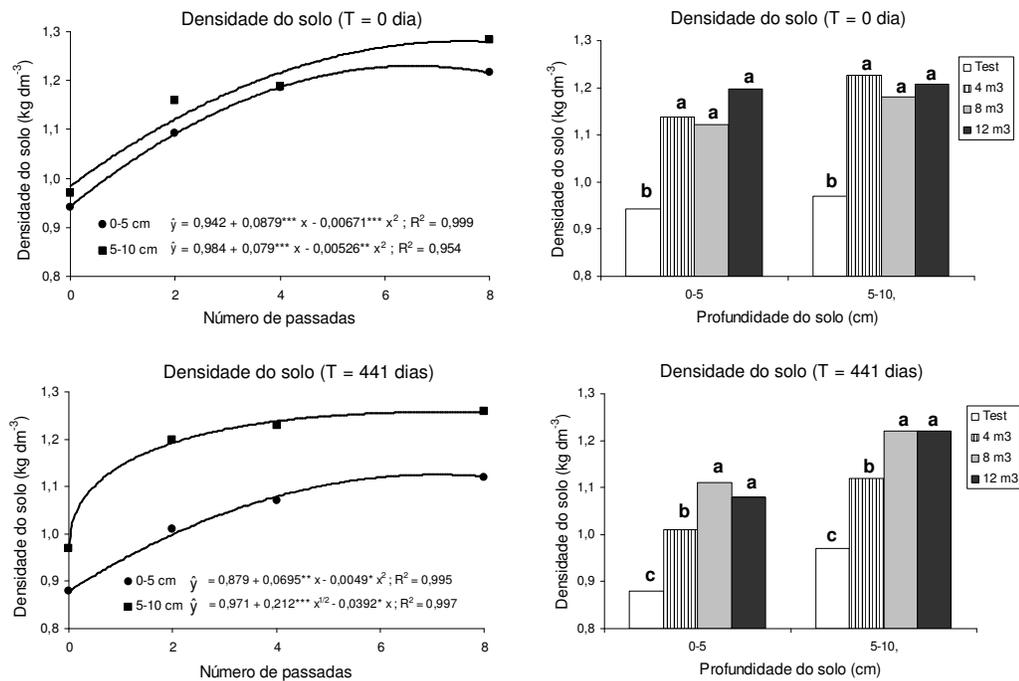


Figura 2. Densidade do solo resultante do número de passadas e carga do forwarder em povoamento de eucalipto, aos 0 e 441 dias.

Koger et al. (1985) constataram que a maior parte da compactação total do solo ocasionada pelo trânsito de um skidder ocorria nas primeiras passadas da máquina. Seixas & Souza (1998) observaram que cerca de 80 % da compactação total ocorrida após 20 passadas de um trator mais carreta carregada de madeira, resultaram das cinco primeiras viagens deste equipamento, não havendo incremento devido ao trânsito subsequente.

Jorajuria & Draghi (2000) relataram que 90 % do incremento máximo da densidade do solo na camada superficial (0-30 cm) foram produzidos já na primeira passada de um trator leve. Segundo Taylor et al. (1982), a primeira passada é considerada como aquela que induz as maiores mudanças na estrutura do solo, o que se restringe às condições de solos recém lavrados. No entanto, quando o solo se encontra consolidado o grau de compactação pode ser similar para as distintas passadas.

No experimento de carga não houve diferença entre 4, 8 e 12 m³ quanto à intensidade de aumento da D_s mensurada na 1^a avaliação (T₀), mas

os valores de D_s foram sempre superiores à testemunha sem tráfego do forwarder. O acréscimo da carga não aumenta, necessariamente, a compactação, pois ocorre aumento da superfície de contato pneu/solo, resultando na redistribuição da carga no solo (Greacen & Sands, 1980; Çarman, 2002). No entanto, observa-se que, após 441 dias, o tratamento com 4 m³ de madeira foi o único que apresentou decréscimo significativo da D_s . Isto revela que maiores cargas proporcionaram efeitos residuais maiores, limitando mais fortemente a capacidade do solo em retornar à densidade original.

Após 441 dias da aplicação dos tratamentos foi observada menor porosidade total e macroporosidade nas duas camadas, e maior microporosidade na camada de 0-5 cm (Figura 3). Nesta camada o acréscimo da microporosidade atingiu 53 % e os decréscimos da porosidade total e da macroporosidade atingiram, respectivamente, 16 e 68 %, com 8 passadas do forwarder. Desta forma, fica evidente a transformação de macroporos em microporos por efeito da compactação. Já na camada de 5-10 cm houve decréscimo de 19 e 51 %, respectivamente, da porosidade total e da macroporosidade, também com 8 passadas do forwarder.

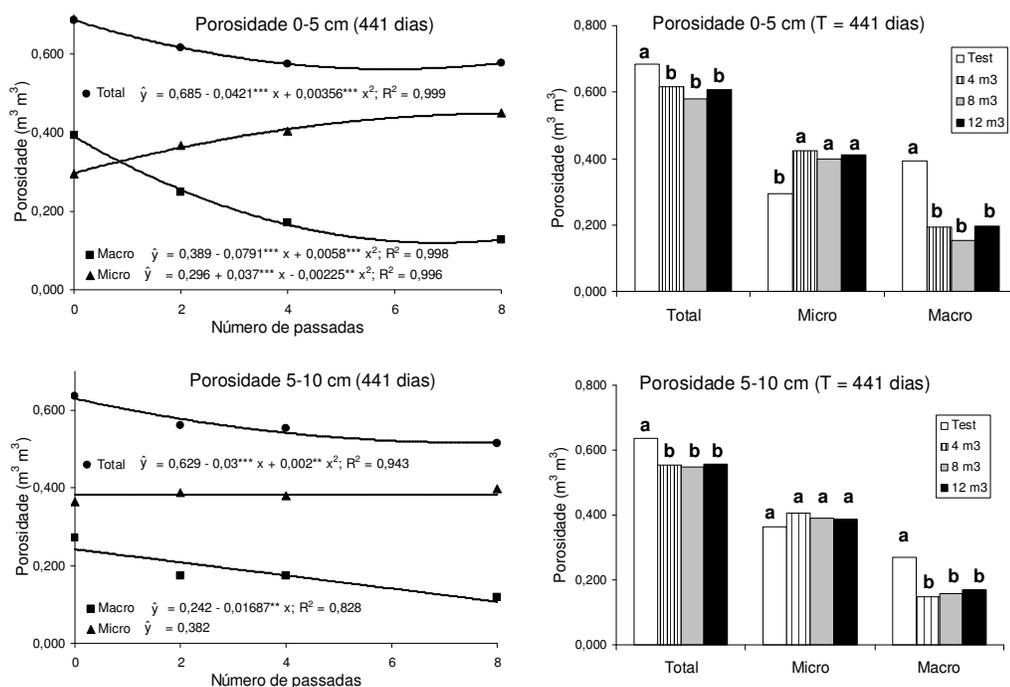


Figura 3. Porosidade do solo resultante do número de passadas e carga do forwarder em povoamento de eucalipto, aos 441 dias.

No entanto, no experimento de carga não houve diferença entre os tratamentos com 4, 8 e 12 m³. Silversides & Sundberg (1989), em análise de compactação de solos em áreas florestais, concluíram que a área de contato do pneu com o solo sofre um acréscimo quando a carga sobre o rodado é aumentada. Contudo, afirmaram que a pressão sobre o solo não é alterada, pois o aumento na área de contato é proporcional ao acréscimo da carga.

Marsili et al. (1998) verificaram decréscimo da macroporosidade na camada superficial (0-10 cm) depois de uma passada de dois tratores, cujo efeito foi intensificado por quatro passadas das máquinas. Nesse trabalho os autores observaram que os efeitos da compactação se restringiram à camada superficial, sendo que na camada de 10-20 cm não houve diferença significativa entre áreas não compactadas e aquelas submetidas a 1 e 4 passadas dos dois tratores. Wagger & Denton (1989) observaram que a porosidade total na área de solo trafegado foi 21 % menor do que na posição não trafegada.

Constatou-se que a porosidade total apresentou correlação significativa ($p < 0,001$) e positiva com a densidade ($r = 0,99$) e com a macroporosidade ($r = 0,80$). Também a macroporosidade teve alta correlação com a densidade ($r = 0,80$).

Houve aumento da resistência à penetração (RP) no solo em resposta à compactação ocasionada pelo trânsito do forwarder (Figura 4), como observado em outros trabalhos (Marsili et al., 1998; Marsili & Servadio, 1996). O aumento da RP foi de 4,2 e 3,7 vezes com 8 passadas da máquina em relação a testemunha não compactada, respectivamente, nas camadas de 0-5 e 5-10 cm. Duas passadas do forwarder foram suficientes para proporcionar 34 e 54 % deste incremento nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, respectivamente. Verificou-se que não houve diferença entre os tratamentos com 4, 8 e 12 m³ de madeira. Balbuena et al. (2000) verificaram que, quando se incrementa a intensidade de trânsito por aumento do número de passagens, aumenta o grau de compactação do solo de forma independente da carga sobre o rodado.

Os valores máximos de RP foram de 2,36 e 2,02 MPa, respectivamente, nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, com 8 passadas da máquina, sendo menores que 2,87 MPa obtidos por Fernandes & Souza (2003) nas trilhas, depois da última passada do forwarder. Esta diferença de RP obtida nos

dois trabalhos pode ser devido à umidade do solo durante a mensuração com penetrômetro, ou ao tipo de solo, ou às características das máquinas (forwarder). A compactação, como evidenciada pelo aumento da resistência à penetração, reduz a penetrabilidade de raízes no solo (Unger & Kaspar, 1994). É importante destacar que qualquer RP superior a 2 MPa pode reduzir o crescimento e desenvolvimento radicular (Ishaq et al., 2001b; Martino & Shaykewich, 1994; Oussible et al., 1992).

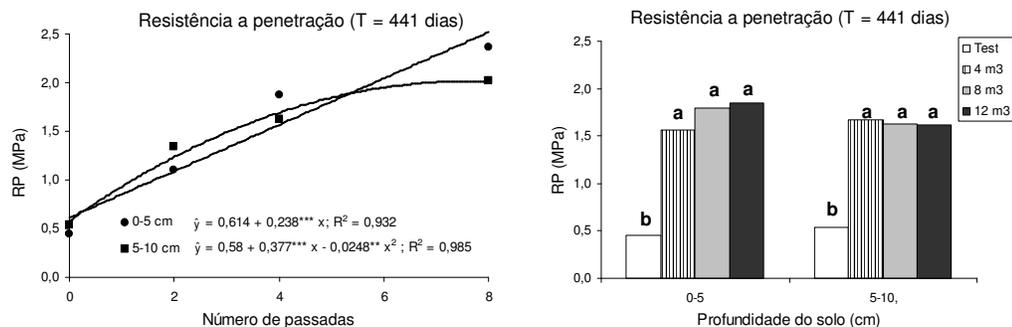


Figura 4. Resistência à penetração do solo resultante do número de passadas e carga do forwarder em povoamento de eucalipto, aos 441 dias.

A RP apresentou correlação significativa ($p < 0,001$) e positiva com a densidade ($r = 0,75$) e com a microporosidade ($r = 0,52$), e negativa com a porosidade total ($r = -0,75$) e com a macroporosidade ($r = -0,76$). Pagliai et al. (1992) e Marsili et al. (1998), em experimentos de compactação do solo pelo trânsito de máquinas, também obtiveram boa correlação negativa entre RP e macroporosidade na camada de 0-10 cm de profundidade.

Houve decréscimo de 32 e 47 vezes da velocidade de infiltração básica (VIB) com 8 passadas do forwarder, respectivamente, na 1ª (T_0) e 2ª avaliações (T_{441}) (Figura 5). Constata-se que apenas 2 passadas foram suficientes para ocasionar quase a totalidade desta redução. No entanto, não houve diferença entre os tratamentos com 4, 8 e 12 m³ de madeira. É interessante observar que praticamente não ocorreu recuperação desta propriedade hidráulica do solo após 441 dias da compactação realizada pelo forwarder. Startsev & McNabb (2000) também verificaram que a redução da VIB, após o trânsito do forwarder e do skidder, não foi recuperada completamente após três anos da realização da compactação. Esses autores observaram que as primeiras três passadas das máquinas foram suficientes

para ocasionar a maior redução da VIB, não ocorrendo alteração significativa pelo trânsito adicional (7 e 12 passadas).

Constatou-se que a VIB apresentou correlação significativa ($p < 0,001$) e negativa com a densidade ($r = -0,68$), com a RP ($r = -0,75$) e com a microporosidade ($r = -0,52$) e positiva com a porosidade total ($r = 0,68$) e com a macroporosidade ($r = 0,73$). Beutler et al. (2001) também encontraram correlação significativa ($p < 0,05$) e negativa da VIB com a RP ($r = -0,98$).

A redução da VIB, ocasionada pela compactação do solo, pode ser atribuída à modificação do sistema poroso, ou seja, da distribuição do tamanho, alongação e continuidade vertical dos poros. Marsili et al. (1998) atribuíram o forte decréscimo da condutividade hidráulica após quatro passadas de dois tratores à redução da continuidade vertical dos poros. Eles obtiveram alta correlação entre poros longos verticais e a condutividade hidráulica e macroporosidade.

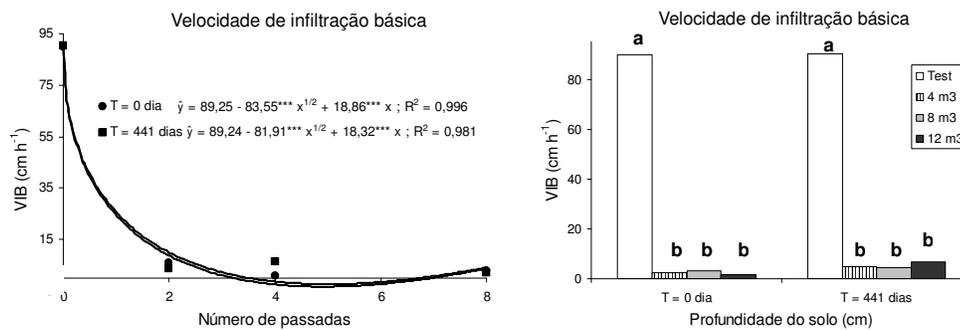


Figura 5. Velocidade de infiltração básica (VIB) de água no solo resultante do número de passadas e carga do forwarder em povoamento de eucalipto, aos 0 e 441 dias.

A VIB de um solo é uma característica muito importante com relação ao armazenamento de água no solo e à erosão. Solos com menor VIB estão mais sujeitos à erosão, devido à maior quantidade de água que permanece na superfície do solo e conseqüente aumento de escoamento superficial (Cerdà, 1996, Marsili et al., 1998). Este volume de água que deixa de infiltrar é perdido e torna-se indisponível para as plantas.

Houve decréscimo do diâmetro médio geométrico (DMG) com o número de passadas do forwarder (Figura 6). No experimento de carga verificou-se que não ocorreu diferença entre os tratamentos com 4, 8 e 12 m³

de madeira, exceto para 12 m³ na camada de 5-10 cm no T₀, cujo aumento do DMG pode ser atribuído à agregação física forçada pela compressão das rodas do forwarder que, no entanto, não formou agregados estáveis, como pode ser evidenciado pelo decréscimo de 12 % do DMG (de 1,58 mm no T₀ para 1,39 mm no T₄₄₁) neste tratamento após 441 dias. Observa-se em todos os tratamentos, inclusive na testemunha não compactada, que o DMG foi menor aos 441 dias após a 1^a avaliação, o que pode ser atribuído à época de amostragem, onde a 2^a coleta foi precedida por longo período de chuvas (Figura 1), o que provavelmente reduziu a resistência à desfragmentação dos agregados.

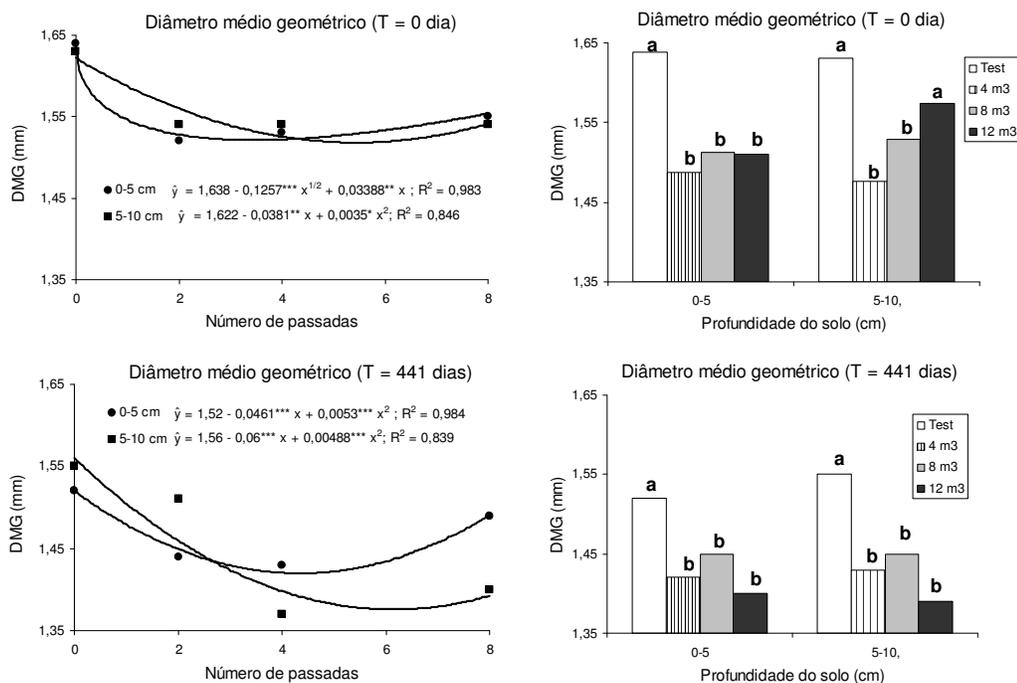


Figura 6. Diâmetro médio geométrico (DMG) de agregados estáveis em água afetados pelo número de passadas e carga do forwarder em povoamento de eucalipto, aos 0 e 441 dias.

A redução do DMG ocasionada pela compactação é prejudicial à manutenção das propriedades físicas do solo, uma vez que os agregados estáveis em água correlacionam-se bem com a permeabilidade e susceptibilidade do solo à erosão hídrica, e indicam indiretamente a qualidade estrutural do solo (Silva et al., 2000).

O aumento do número de passadas do forwarder ocasionou maior teor de C orgânico total, principalmente na camada de 0-5 cm, e de N total na camada de 5-10 cm, 441 dias após a compactação (Figura 7). Na realidade, nos solos compactados houve redução da taxa de mineralização da matéria orgânica do solo (MOS) durante os 441 dias posteriores à aplicação dos tratamentos, devido ao provável aumento da proteção física da MOS com a compactação do solo. No entanto, não houve diferença entre os tratamentos no experimento de carga.

Breland & Hansen (1996) relataram que a compactação reduz a porosidade total do solo e altera a distribuição de tamanho de poros, favorecendo o incremento da percentagem de poros menores, nos quais materiais orgânicos podem ser fisicamente protegidos da ação microbiana.

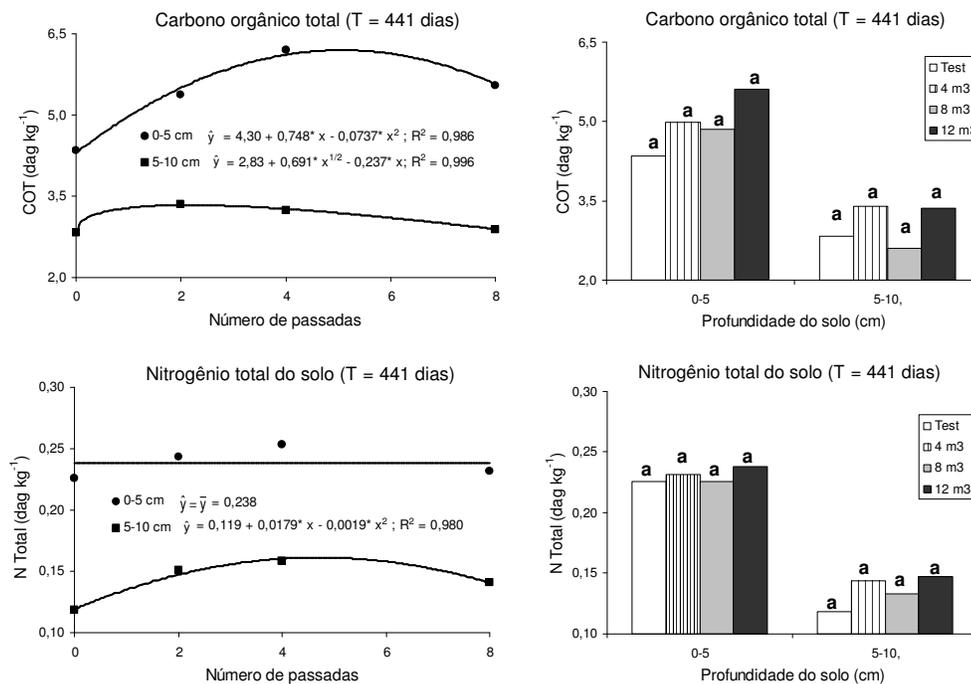


Figura 7. Carbono orgânico total e nitrogênio total do solo afetados pelo número de passadas e carga do forwarder em povoamento de eucalipto, aos 441 dias.

Houve diferença entre os modelos de resposta de mineralização de C e N, o que pode ser atribuído à ocorrência de denitrificação em poros cujo diâmetro foi muito reduzido pela compactação, a qual promove decréscimo da difusão de oxigênio (Renault & Stengel, 1994; Jensen et al., 1996). Segundo

Breland & Hansen (1996) a redução do volume total de poros depois da compactação aumenta a probabilidade de condições anaeróbicas. Isto pode fortemente inibir a decomposição de materiais orgânicos e aumentar perdas gasosas de N por denitrificação (Hansen et al., 1993).

Não houve efeito do número de passadas sobre o teor de nitrogênio amoniacal do solo (N-NH_4^+) após 441 dias da aplicação dos tratamentos (Figura 8). Entretanto, no experimento de carga apenas os tratamentos com 4 e 12 m^3 , na profundidade de 5-10 cm, tiveram maior N-NH_4^+ em relação à testemunha não compactada.

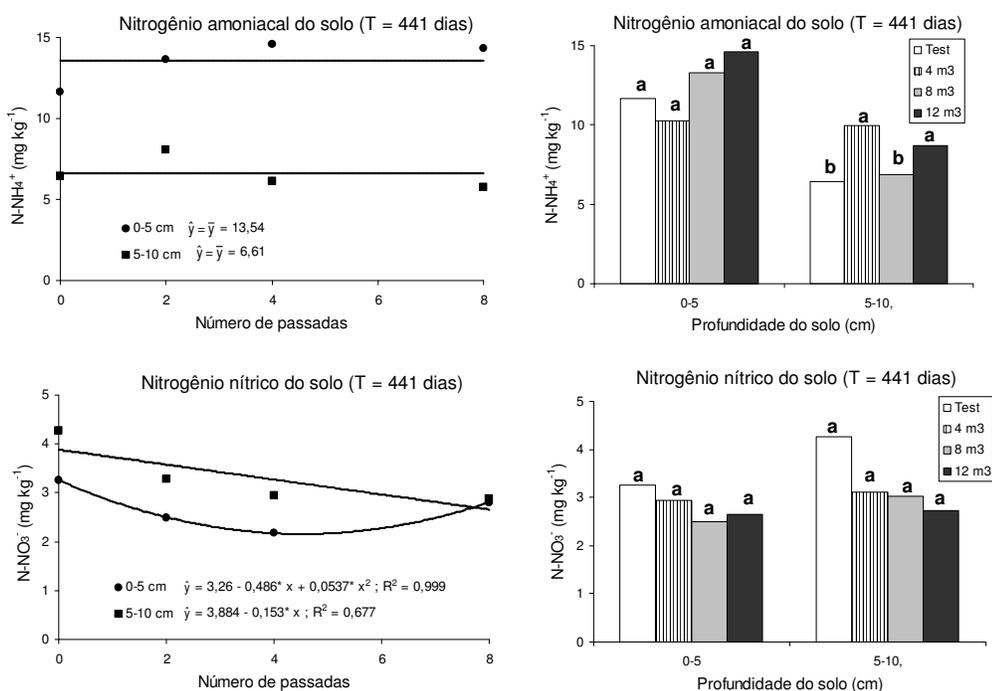


Figura 8. Nitrogênio amoniacal e nítrico do solo resultante do número de passadas e carga do forwarder em povoamento de eucalipto, aos 441 dias.

O nitrogênio nítrico do solo (N-NO_3^-) foi reduzido com o incremento do número de passadas (Figura 8). Esta redução pode ter sido ocasionada pela compactação, que incrementa as condições anaeróbicas e promove perdas de N-NO_3^- por meio da denitrificação, que ocorre quando NO_3^- está presente em microsítios anaeróbicos, onde a demanda microbiana por O_2 excede o suprimento mediado pela difusão (Arah & Smith, 1989; Adams & Akhtar, 1994). No entanto, não houve diferença entre os tratamentos no experimento de carga após 441 dias da compactação inicial.

Breland & Hansen (1996) verificaram que a compactação não afetou as quantidades relativas de $N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$ no solo, e sugeriram que a redução da aeração do solo não foi grande o bastante para afetar a nitrificação.

Dentre as mensurações realizadas nas árvores 406 dias após o plantio, apenas o diâmetro à altura do peito (DAP) apresentou resposta quadrática ao número de passadas (Figura 9). Não houve diferença entre os tratamentos no experimento de carga.

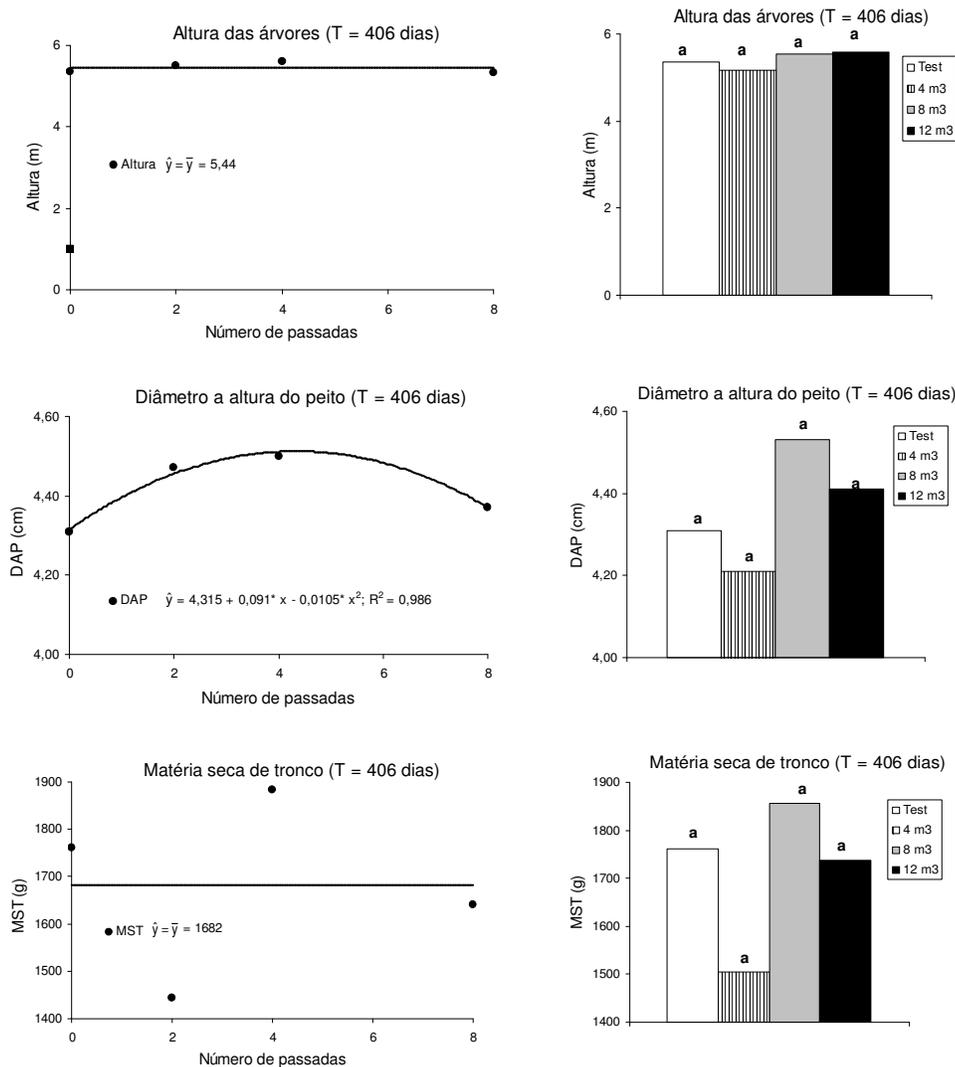


Figura 9. Altura, diâmetro a altura do peito e matéria seca de tronco de árvores de eucalipto cultivadas por 406 dias em solo submetido a diferentes números de passadas e cargas do forwarder.

Segundo Greacen & Sands (1980) há uma densidade do solo ótima para o crescimento das árvores, acima e abaixo da qual ocorre redução da produtividade. Segundo esses autores os efeitos da compactação sobre o crescimento de raízes podem ser resultado de interações complexas entre a resistência do solo à penetração, disponibilidade de água e nutrientes, e aeração.

Pode-se atribuir esta pequena resposta à compactação, ao efeito das covas sobre o crescimento do sistema radicular das plantas. Para o plantio das mudas de eucalipto foram abertas covas de 30 x 30 x 30 cm nas trilhas do forwarder, o que provavelmente permitiu a expansão do sistema radicular para a região de solo adjacente não compactado, permitindo desta forma o pleno desenvolvimento das plantas. Sabe-se também que o aumento da resistência do solo à penetração pode ser restritiva ao crescimento radicular acima de certos valores que variam de 1,5 a 3,0 MPa, conforme Grant & Lafond (1993), e de 2,0 a 4,0 MPa, segundo Oussible et al. (1992) e Arshad et al. (1996). Como os valores máximos de RP foram de 2,36 e 2,02 MPa, respectivamente, nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, com 8 passadas do forwarder, e a intensidade de chuva nos meses que precederam a colheita foi alta, pode-se presumir que houve desenvolvimento do sistema radicular mesmo nas regiões de solo compactado, uma vez que a resistência à penetração decresce substancialmente com o aumento da umidade do solo.

CONCLUSÕES

1. O trânsito do forwarder aumentou a densidade, microporosidade e a resistência do solo à penetração; reduziu a estabilidade de agregados em água, porosidade total, macroporosidade e infiltração de água no solo. Não houve efeito da compactação sobre a produção de matéria seca de tronco e altura das árvores.
2. A maior parte dos efeitos da compactação foi manifestada a partir de duas passadas do forwarder.
3. Os efeitos da compactação permaneceram após 441 dias do trânsito do forwarder, embora há sinal de recuperação de algumas características do solo.

4. A intensidade de trânsito é mais importante do que a carga quanto ao incremento da compactação do solo pelo forwarder.

LITERATURA CITADA

- ALAKUKKU, L. & ELONEN, P. Finish experiment on subsoil compaction by vehicles with high axle load. *Soil Till. Res.*, 29:151-155, 1994.
- ADAMS, W.A. & AKHTAR, N. The possible consequences for herbage growth of waterlogging compacted pasture soils. *Plant Soil*, 162:1-17, 1994.
- ARAH, J.R.M. & SMITH, K.A. Steady-state denitrification in aggregated soils: a mathematical model. *J. Soil Sci.*, 40:139-149, 1989.
- ARSHAD, M.A.; LOWERY, B. & GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., eds. *Methods for assessing soil quality*. Madison, Soil Science Society of America. 1996. p. 123-141 (SSSA Special publication 49).
- BALBUENA, R.H.; TERMINIELLO, A.M.; CLAVERIE, J.A.; CASADO, J.P. & MARLATS, R. Compactación del suelo durante la cosecha forestal. Evolución de las propiedades físicas. *R. Bras. Eng. Agric. Ambient.*, 4:453-459, 2000.
- BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.C. & PEREIRA FILHO, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:167-177, 2001.
- BLACK, G.R.; NELSON, W.W. & ALLMARAS, R.R. Persistence of subsoil compaction in a mollisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40:943-948, 1976.
- BRELAND, T.A. & HANSEN, S. Nitrogen mineralization and microbial biomass as affected by soil compaction. *Soil Biol. Biochem.*, 28:655-663, 1996.
- BREMNER, J.M. & MULVANEY, C.S. Nitrogen – Total. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R., eds. *Methods of soil analysis*, 2.ed. Part 2. Madison: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1982. p.595-624.
- ÇARMAN, K. Compaction characteristics of towed wheels on clay loam in a soil bin. *Soil Till. Res.*, 65:37-43, 2002.
- CERDÀ, A. Seasonal variability of infiltration rates under contrasting slope conditions in southeast Spain. *Geoderma*, 69:217-232, 1996.

- CORNS, I.G.W. Compaction by forestry equipment and effects on coniferous seedling growth on four soils in the Alberta foothills. *Can. J. For. Res.*, 18:75-84, 1988.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- FERNANDES, H.C. & SOUZA, A.P. Compactação de um Latossolo Vermelho causada pelo tráfego do "Forwarder". *R. Árvore*, 27:279-284, 2003.
- FROELICH, H.A.; MILES, D.W.R. & ROBBINS, R.W. Soil bulk density recovery on compacted skid trails in central Idaho. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:1015-1017, 1985.
- GRANT, C.A. & LAFOND, G.P. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in southern Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.*, 73:223-232, 1993.
- GREACEN, E.L. & SANDS, R. Compaction of forest soils: a review. *Aust. J. Soil Res.*, 18:163-89, 1980.
- HÅKANSSON, I.; VOORHEESS, W.B. & RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop responses in different traffic regimes. *Soil Till. Res.*, 11:239-282, 1988.
- HÅKANSSON, I. & REEDER, R.C. Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response. *Soil Till. Res.*, 29:277-304, 1994.
- HÅKANSSON, I. & VOORHEES, W.B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTINE, C. & STEWARD, B.A., eds. *Methods for assessment of soil degradation. Advances in soil science.* Boca Raton, CRC Press, 1998. p.167-179.
- HAMMEL, J.E. Effect of high axle load traffic on subsoil physical properties and crop yields in the Pacific Northwest, USA. *Soil Till. Res.*, 29:195-203, 1994.
- HANSEN, S.; MAEHLUM, J.E. & BAKKEN, L.R. N₂O and CH₄ fluxes in soil influenced by fertilization and tractor traffic. *Soil Biol. Biochem.*, 25:621-630, 1993.
- HATCHELL, G.E.; RALSTON, C.W. & FOIL, R.R. Soil disturbance in logging. *J. For.*, 68:772-775, 1970.
- ISHAQ, M.; HASSAN, A.; SAEED, M.; IBRAHIM, M. & LAL, R. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan. I. Soil physical properties and crop yield. *Soil Till. Res.*, 59:57-65, 2001a.

- ISHAQ, M.; HASSAN, A.; SAEED, M.; IBRAHIM, M. & LAL, R. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan. II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. *Soil Till. Res.*, 60:153-161, 2001b.
- JAKOBSEN, B.F. & GREACEN, E.L. Compaction of sandy forest soils by Forwarder operations. *Soil Till. Res.*, 5:55-70, 1985.
- JENSEN, L.S.; McQUEEN, D.J.; ROSS, D.J. & TATE, K.R. Effects of soil compaction on N-mineralization and microbial-C and -N. II. Laboratory simulation. *Soil Till. Res.*, 38:189-202, 1996.
- JORAJURIA, D. & DRAGHI, L. Sobrecompactación del suelo agrícola. Parte I: Influencia diferencial del peso y del número de pasadas. *R. Bras. Eng. Agric. Ambient.*, 4:445-452, 2000.
- JORAJURIA, D.; DRAGHI, L. & ARAGON, A. The effect of vehicle weight on the distribution of compaction with depth and the yield of *Lolium/Trifolium* grassland. *Soil Till. Res.*, 41:1-12, 1997.
- KAYOMBO, B. & LAL, R. Responses of tropical crops to soil compaction. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.287-316.
- KEMPER, W.D. & ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis. Part 1 – Physical and mineralogical methods*. SSSA book series, 2^a ed., 1986. p.425-442.
- KEMPERS, A.J. & ZWEERS, A. Ammonium determination in soil extracts by the salicylate method. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 17:715-723, 1986.
- KOGER, J.L.; BURT, E.C. & TROUSE, A.C. Multiple pass effects of skidder tires on soil compaction. *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs.*, 28:11-16, 1985.
- LAL, R. Axle load and tillage effects on crop yields on a Mollic Ochraqualf in northwest Ohio. *Soil Till. Res.*, 37:143-160, 1996.
- LEVY, G.J. & MILLER, W.P. Aggregate stabilities of some southeastern U.S. soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:1176-1182, 1997.
- LOGSDON, S.D.; ALLMARAS, R.R.; NELSON, W.W. & VOORHEES, W.B. Persistence of subsoil compaction from heavy axle loads. *Soil Till. Res.*, 23:95-110, 1992.
- MARSILI, A. & SERVADIO, P. Compaction effects of rubber or metal-tracked tractor passes on agricultural soils. *Soil Till. Res.*, 37:37-45, 1996.
- MARSILI, A.; SERVADIO, P.; PAGLIAI, M. & VIGNOZZI, N. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber – and metal-tracked tractors. *Soil Till. Res.*, 49:185-199, 1998.

- MARTINO, D.L. & SHAYKEWICH, C.F. Root penetration profiles of wheat and barley as affected by soil penetration resistance in field conditions. *Can. J. Soil Sci.*, 74:193-200, 1994.
- NUGENT, C.; KANALI, C.; OWENDE, P.M.O.; NIEUWENHUIS, M. & WARD, S. Characteristic site disturbance due to harvesting and extraction machinery traffic on sensitive forest sites with peat soils. *For. Ecol. Manage.*, 180:85-98, 2003.
- OUSSIBLE, M.; CROOKSTON, P.K. & LARSON, W.E. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat. *Agron. J.*, 84:34-38, 1992.
- PAGLIAI, M.; FEBO, P.; La MARCA, M. & LUCAMONTE, G. Effetti del compattamento provocato da differenti tipi di pneumatici su porosità e struttura del terreno. *Riv. Ingeg. Agr.*, 3:168-176, 1992.
- PANAYITOPOULOS, K.P.; PAPADOPOULOU, C.P. & HATJIOANNIDOU, A. Compaction and penetration resistance of an Alfisol and Entisol and their influence on root growth of maize seedlings. *Soil Till. Res.*, 31:323-337, 1994.
- POLLARD, F. & ELLIOTT, J.G. The effect of soil compaction and method of fertilizer placement on the growth of barley using a concrete track technique. *J. Agric. Eng. Res.*, 23:203-216, 1978.
- RENAULT, P. & STENGEL, P. Modelling oxygen diffusion in aggregated soils. I. Anaerobiosis inside the aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1017-1023, 1994.
- SEIXAS, F. & SOUZA, C.R.S. The use of bulk density and cone penetrometer resistance as indicators to evaluate the influence of forestry machine traffic on soil compaction. In: IUFRO CONFERENCE ON INDICATORS FOR SUSTAINABLE FOREST MANAGEMENT, Melbourne, 1998. Proceedings. Melbourne: Natural Resources and Environment, 1998. p. 156-157.
- SILVA, M.L.N.; CURI, N. & BLANCANEUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. *Pesq. Agrop. Bras.*, 35:2485-2492, 2000.
- SILVA, S.R. Efeitos da compactação sobre características físicas, químicas e microbiológicas de dois Latossolos e no crescimento de eucalipto. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2005. 98p. (Tese de Doutorado)
- SILVERSIDES, C.R. & SUNDBERG, U. Operational efficiency in forestry. Netherlands: Kluwer Academic, 1989. v.2. 169p.
- STARTSEV, A.D. & McNABB, D.H. Effects of skidding on forest soil infiltration in west-central Alberta. *Can. J. Soil Sci.*, 80:617-624, 2000.

- TAYLOR, J.; BURT, E. & BAILEY, N. Multipass behavior of a pneumatic tire in tilled soils. ASAE Paper N° 79-1549, St. Joseph, MI, 1982.
- UNGER, P.W. Organic matter and water-stable aggregate distribution in ridge-tilled surface soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 59:1141-1145, 1995.
- UNGER, P.W. & KASPAR, T.C. Soil compaction and root growth: A review. J. Agron., 86:759-766, 1994.
- VOORHEES, W.B.; SENST, C.G. & NELSON, W.W. Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the Northern Corn Belt. Soil Sci. Soc. Am. J., 42:344-349, 1978.
- VOORHEES, W.B.; NELSON, W.W. & RANDALL, G.W. Extent and persistence of subsoil compaction caused by heavy axle loads. Soil Sci. Soc. Am. J., 50:428-433, 1986.
- WAGGER, M.G. & DENTON, H.P. Influence of cover crop and wheel traffic on soil physical properties in continuous no till corn. Soil Sci. Soc. Am. J., 53:1206-1210, 1989.
- WALKLEY, A. & BLACK, I.A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci., 37:29-38, 1934.
- WERT, S. & THOMAS, B.R. Effects of skid roads on diameter, height, and volume growth in Douglas-fir. Soil Sci. Soc. Am. J., 45:629-632, 1981.
- YANG, J.E.; SKOGLEY, E.O.; SCHAFF, B.E. & KIM, J.J. A simple spectrophotometric determination of nitrate in water, resin, and soil extracts. Soil Sci. Soc. Am. J., 62:1108-1115, 1998.

CONCLUSÕES GERAIS

1. Solos caulíníticos são mais sensíveis à compactação do que os oxídicos-gibbsíticos.
2. O incremento da microporosidade com a compactação aumenta a retenção de água no solo nas tensões de 0,01 e 1,5 MPa, tanto em base volumétrica como em base gravimétrica. No entanto, este aumento não se expressa em termos de conteúdo de água disponível no solo (ADS).
3. A compactação pode reduzir o FDP e aumentar o FDK, Zn, Cu, Fe e Mn.
4. A compactação diminui a ciclagem de carbono orgânico do solo devido ao aumento da proteção física da matéria orgânica e à menor atividade microbiana aeróbica.
5. Pressões de compactação superiores a 540 kPa intensificam a formação de ambiente anaeróbico que promove perdas de nitrogênio por denitrificação.
6. A condutividade hidráulica e a resistência à penetração foram as propriedades do solo que apresentaram maior sensibilidade aos efeitos da compactação, com maior potencial de uso para a avaliação da qualidade estrutural do solo.
7. A alta umidade do solo durante a compressão é um fator determinante para a manifestação dos efeitos deletérios da compactação sobre o crescimento e nutrição do eucalipto.

8. A maior parte dos efeitos da compactação foi manifestada por apenas duas (no LA) ou quatro (no LVA) passadas do forwarder.
9. Os efeitos da compactação permaneceram após 441 dias do trânsito do forwarder, embora há sinal de recuperação de algumas características do solo.