SCIENTIA
FORESTALIS

Variabilidade espacial da compactação de um solo submetido ao tráfego de *harvester* e *forwarder*

Spatial variability of compactation of a soil subjected to traffic by the *harvester* and *forwarder*

Carla Krulikowski Rodrigues[1], Eduardo da Silva Lopes[2], Marcelo Marques Lopes Müller[3] e Aline Marques Genú[3]

Resumo

Este trabalho objetivou avaliar a variabilidade espacial da compactação de um solo submetido ao tráfego de um *harvester* e *forwarder*, visando subsidiar o planejamento das operações florestais. O estudo foi realizado em uma empresa florestal localizada no município de Telêmaco Borba, estado do Paraná, Brasil, em um Latossolo Vermelho de textura franco-argilo-arenosa. Foi avaliada a resistência do solo à penetração (RSP) em quatro diferentes distâncias de extração (0 a 50, 51 a 100, 101 a 150 e 151 a 200 m), utilizando malha amostral retangular (XY) com 15 pontos na abscissa (X) e 10 pontos na ordenada (Y), nas profundidades médias de 0 a 10; 10,1 a 20; 20,1 a 40,0 e 40,1 a 60 cm. Os dados foram analisados inicialmente pelo teste de DMS de Fisher para amostras independentes, seguido do uso de técnicas geoestatísticas para os ajustes dos semivariogramas, krigagem ordinária, construção dos mapas temáticos e obtenção do percentual da área compactada. Os resultados mostraram que as camadas superficiais do solo foram compactadas nas primeiras passadas dos rodados das máquinas, não apresentando diferença significativa ao longo da trilha de extração, com valores médios abaixo do valor crítico de 2 MPa. Pela análise geoestatística pôde-se observar que a primeira classe de distância de 0 a 50 m apresentou em alguns locais, valores acima do valor crítico, devido à maior intensidade de tráfego que ocorre na margem do talhão.

Palavras-chave: Colheita mecanizada, danos no solo, geoestatística.

Abstract

This study aimed to evaluate the spatial variability of soil compaction subjected to a harvester and forwarder traffic, in order to support the planning of forestry operations. The study was conducted in a forest company located in the municipality of Telêmaco Borba, Paraná, Brazil, in an Oxisol of sandy clay loam texture. Soil penetration resistance (SPR) was evaluated in four different extraction distances (0-50, 51-100, 101-150 and 151-200 m) using rectangular sampling grid (XY) with 15 points on the abscissa (X) and 10 points on the ordinate (Y), the average depths of 0 to 10 , 10.1 to 20, 20.1 to 40.0 and 40.1 to 60 cm. Data were initially analyzed by the DMS Fisher test for independent samples, followed by the use of geo-statistical techniques for the settings of the semivariogram, ordinary kriging, construction of thematic maps and obtaining the percentage of compacted area. The results showed that the soil layers were compressed in the first passes of the wheeled machines, not significantly so along the extraction trail difference, with mean values below the critical value of 2 MPa. With the geo-statistical analysis it was observed that in the first distance class 0-50 m, presented some values above the critical value, due to higher traffic levels that occurs at the edge of the field.

Keywords: Mechanized harvesting, soil damage, geo-statistic.

INTRODUÇÃO

O aumento no processo de mecanização das operações de colheita da madeira possibilitou às empresas florestais um aumento significativo da produtividade e redução de custos. Entretanto, as questões ambientais tornaram-se uma preocupação constante entre os gestores na busca da sustentabilidade florestal, acarretado principalmente pelo aumento da compactação do solo devido ao tráfego de máquinas de grande porte.

Reichert et al. (2010) define a compactação do solo como a aproximação de suas partículas com redução do volume, incremento da densi-

[1]Mestre em Ciências Florestais. UNICENTRO – Universidade Estadual do Centro-Oeste. Campus de Irati – 84.500-000 – Irati, PR. E-mail: carlakr@gmail.com.

[2]Professor Doutor em Ciências Florestais do Departamento de Engenharia Florestal. UNICENTRO – Universidade Estadual do Centro-Oeste. Campus de Irati – 84.500-000 – Irati, PR. E-mail: eslopes@pq.cnpq.br.

[3]Professor Doutor em Agronomia do Departamento de Agronomia. UNICENTRO – Universidade Estadual do Centro-Oeste. Campus - Cedeteg – 85.040-080 – Guarapuava, PR. E-mail: mmuller@unicentro.br; agenu@unicentro.br.

dade, redução do espaço poroso, infiltração e movimento interno de água, bem como a ocorrência de uma maior resistência mecânica do solo ao crescimento das raízes.

Atualmente, a compactação do solo nas áreas florestais vem sendo amplamente estudada, sendo afetada por diversos fatores, com destaque para a intensidade de tráfego, que normalmente é elevado durante a colheita da madeira, podendo promover maior compactação do solo com alterações em suas propriedades físicas, químicas e biológicas (REICHERT et al., 2007; LOPES et al., 2011; SAMPIETRO; LOPES, 2011).

Porém, existem poucos trabalhos que investigaram o comportamento da intensidade de tráfego na compactação do solo nos diferentes locais do talhão, sendo seu conhecimento importante para o planejamento das operações florestais, principalmente em relação ao preparo do solo.

Fenner (2002) estudando alguns sistemas de colheita da madeira constatou que o tráfego de *feller buncher* e *skidder* afetou praticamente toda a área do talhão, enquanto de um *harvester* e *forwarder* ficou concentrado nos ramais de extração da madeira. Dias Jr. et al. (2003) dizem que as operações com *harvester* e *forwarder* podem causar maior degradação na estrutura do solo, com impactos sendo sistemáticos, abrangendo posições definidas e em menor área do talhão. Já Silva et al. (2004) relatam que a compactação do solo é mais intensa em áreas próximas às margens do talhão, ocasionado pela maior intensidade de tráfego das máquinas nestes locais, enquanto Lima et al. (2008) avaliando a seção transversal à trilha de tráfego de um *feller buncher* e *skidder* utilizando técnicas de geoestatística, concluíram que a compactação ficou restrita nas camadas superficiais do solo.

Por outro lado, deve-se ressaltar a importância do uso da geoestatística como ferramenta de apoio em estudos da variabilidade espacial da compactação do solo, pois muitas vezes, a compactação fica limitada nas linhas dos rodados das máquinas e próximas às margens dos talhões, onde tal variabilidade não é detectada pela estatística clássica.

Objetivou-se, neste trabalho, estudar o uso das técnicas de geoestatística na variabilidade espacial da compactação do solo causada por diferentes intensidades de tráfego de um *harvester* e *forwarder* em povoamentos de eucalipto, de forma a subsidiar o planejamento das operações de florestais.

MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa foi realizada em uma empresa florestal localizada no município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná, Brasil, entre as coordenadas geográficas de Latitude 24º 19′ 37″ S e 50º 36′ 58″ W, com altitude média de 760 metros.

O clima predominante da região, de acordo com o sistema de classificação climática de Köppen está situado entre as regiões Cfa e Cfb, com predomínio do Cfa, temperatura média no mês mais frio inferior a 18º C e no mês mais quente acima de 22º C, enquanto a precipitação média anual varia de 1.400 a 1.600 mm, conforme informações do Instituto Agronômico do Paraná (CAVIGLIONE, 2000).

O solo predominante da área de estudo foi classificado pela empresa como Latossolo Vermelho Distrófico Típico (LVd). Para conferir a textura foram obtidas amostras de solo com auxílio de um trado holandês em um ponto amostral dentro de cada classe de distância de extração e em diferentes profundidades. A textura e umidade gravimétrica do solo foram determinadas em laboratório por meio de metodologias propostas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1997), enquanto o carbono orgânico pelo método Walkley-Black modificado (PAVAN et al., 1992).

As características do povoamento estudado são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características do povoamento florestal estudado.
Table 1. Characteristics of the forest population under consideration.

Declividade do terreno	3 a 8%
Idade do povoamento	7 anos
Espécie plantada	*Eucalyptus grandis*
Número de árvores por hectare	1.217 ha^{-1}
Área basal do povoamento	30,2 m^2 ha^{-1}
Diâmetro médio das árvores (DAP)	17,5 cm
Altura média das árvores	28,2 m
Volume médio individual das árvores	0,3043 m^3
Volume médio das árvores	370 m^3 ha^{-1}
Peso médio das árvores	324,5 t

O sistema de colheita da madeira utilizado pela empresa na área de estudo era de toras curtas (*cut to length*), sendo a derrubada e processamento das árvores realizado por um trator florestal *harvester*, enquanto a extração das toras de comprimento de 3,6 m do interior para a margem do talhão realizado por um trator florestal *forwarder*.

O *harvester* era da marca *Caterpillar*, modelo 320D FM, equipado com motor *Caterpillar* C6.4

ACERT de potência nominal de 157 hp/117 kW, horímetro com 3.400 horas, peso operacional de 26,9 t (sem cabeçote), rodados de esteiras com dimensões de 0,70 m de largura por 4,56 m de comprimento e distância entre rodados de 1,90 m, enquanto o cabeçote era da marca *Log Max*, modelo 7000C, com peso operacional de 1,62 t, diâmetro máximo de corte de 750 mm.

O *forwarder* era da marca *Valmet*, modelo 890.3, equipado com motor *Valmet* 74 CTA (diesel), de potência nominal de 204 hp/150 kW, horímetro com 17.200 horas, peso operacional de 19,1 t, rodados de pneus com tração 8 x 8, distância entre rodados de 1,70 m, compartimento de carga com capacidade bruta de 18,0 t e área de 5,6 a 6,0 m^2, grua com alcance máximo de 7,50 m de distância horizontal e 8,5 m de altura.

Os dados foram coletados após finalizada as operações de colheita da madeira, sendo a compactação determinada pela resistência do solo à penetração (RSP). Foi utilizado um penetrógrafo eletrônico digital da marca *Eijkelkamp*, modelo 06.15.SA, equipado com uma ponta em forma de cone com ângulo de vértice de 60º e base de 1 cm^2, com a velocidade de penetração máxima de 2 cm s^{-1}.

Para a avaliação da compactação causada pelo tráfego das máquinas foram retiradas amostras de solo em dois ramais de extração nas distâncias de 25; 75; 125 e 175 m em relação à margem do talhão, compreendendo as faixas de extração de 0 a 50; 51 a 100; 101 a 150 e 151 a 200 m, onde ocorreu uma passada do *harvester*, e em média, 20, 16, 10 e 6 passadas do *forwarder* vazio e carregado, respectivamente (Figura 1).

Foram estabelecidas, em cada classe de distância de extração, malhas amostrais retangulares (XY), possuindo 150 pontos de RSP, sendo 15 pontos na abscissa (X), nas distâncias de 0,0; 2,0; 4,0; 4,5; 5,0; 5,5; 7,5; 9,0; 10,5; 12,5; 13,0; 13,5; 14,0; 16,0; 18,0 m, abrangendo dois ramais de extração, e 10 pontos na ordenada (Y), equidistantes um metro entre si, contemplando as profundidades de 0 a 10; 10,1 a 20,0; 20,1 a 40 e 40,1 a 60 cm.

Os resultados de RSP foram submetidos ao teste de normalidade e as médias comparadas entre distâncias pelo teste de DMS de Fisher para amostras independentes. Foram elaborados mapas temáticos horizontais nas diferentes classes de distâncias de extração e profundidades estudadas, por meio do programa *Surfer* 8.0, a partir de valores estimados por krigagem e parâmetros dos semivariogramas ajustados, com uso do *software Geostatistical for environmental science* GS+ (2000). Por fim, para a quantificação dos percentuais de área referentes a cada classe da RSP foi utilizado o programa *Idrisi Taiga*, de modo a identificar as zonas homogêneas e localizar e mensurar as áreas afetadas pelo tráfego das máquinas.

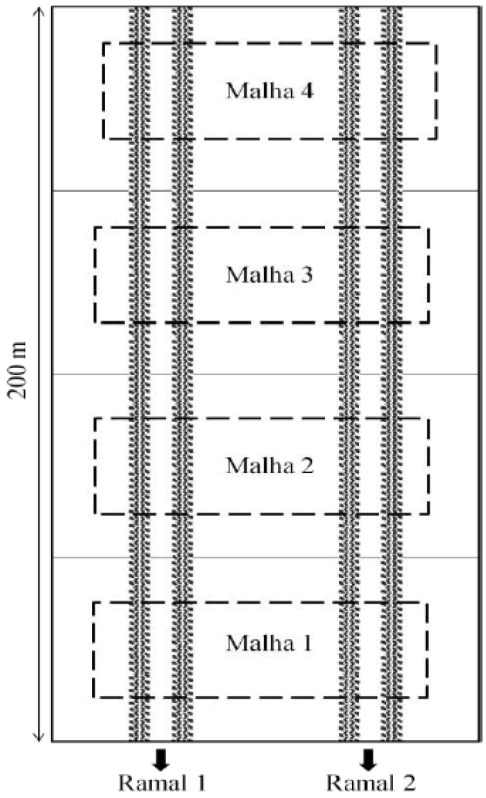

Figura 1. Croqui da alocação das malhas ao longo da trilha de extração de madeira.
Figure 1. Sketch of the allocation of the meshes, along the longging trail.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O solo da área de estudo foi classificado como de textura franco-argilo-arenosa, com teor médio de 266, 62 e 672 g kg^{-1} de argila, silte e areia, respectivamente. O teor médio de carbono orgânico foi decrescente em profundidade, variando de 11,66 kg kg^{-1} na camada de 0 a 10 cm a 9,72 kg kg^{-1} na camada de 40,1 a 60 cm, sendo obtido valor médio de 0,35 kg kg-1 no momento da mensuração dos valores de resistência do solo à penetração (Tabela 2).

Os valores médios da resistência do solo à penetração (RSP) ocasionado pelo tráfego das máquinas nas diferentes distâncias de extração e profundidades estudadas apresentou comportamento semelhante entre si (Tabela 3).

Tal semelhança dos valores de RSP foi resultante da compactação causada nas primeiras passadas das máquinas, sendo que o aumento da intensidade de tráfego não acarretou incre-

mentos significativos da compactação. Os valores médios de RSP ficaram abaixo de 2 MPa, considerado crítico ao desenvolvimento das plantas (GREACEN; SANDS, 1980; WHALLEY et al., 1995; TORMENA et al., 1998).

Desta maneira, os resultados obtidos estão de acordo com Seixas et al., (2003) que, ao avaliarem a compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo causado por um *forwarder* de 42,3 t de peso total em operação, observaram o efeito do maior número de passadas da máquina, atingindo, após 11 passadas, 74% da compactação final resultante de 25 passadas, concluindo que as primeiras passadas das máquinas são responsáveis pelos maiores incrementos da RSP.

Na Tabela 4 são apresentados os ajustes obtidos na construção e análise dos semivariogramas para a RSP nas diferentes distâncias de extração e profundidades do solo. Nas camadas que ajustaram o modelo linear, segundo Vieira (2000), indica grande capacidade de dispersão dos dados na seção estudada, demonstrando que a distância entre as leituras foram insuficientes para estudar a variabilidade espacial da RSP.

Tabela 2. Granulometria média, carbono orgânico do solo e umidade gravimétrica nas profundidades avaliadas.
Table 2. Average particle size, organic soil carbon and gravimetric moisture at the depths evaluated.

Prof.	Areia grossa	Areia fina	Areia total	Silte	Argila	C.O.	Ug
(cm)			(g kg^{-1})			(g kg^{-1})	(kg kg^{-1})
0 a 10	289	405	694	62	244	11,66	0,35
10,1 a 20	227	454	681	56	263	11,27	0,32
20,1 a 40	253	408	661	63	276	9,33	0,35
40,1 a 60	239	414	653	68	279	9,72	0,36
Média	252	420	672	62	266	10,50	0,35

CO: Carbono Orgânico; Prof: Profundidade; Ug: Umidade gravimétrica.

Tabela 3. Valores médios da resistência do solo à penetração (RP), em MPa, ocasionado pelo tráfego das máquinas nas classes de distâncias de extração e profundidades.
Table 3. Mean values of soil resistance to penetration (RP), in MPa caused by machinery traffic in the extraction distance class and depths.

Distância de extração (m)	Profundidade do solo (cm)			
	0 a 10	10,1 a 20	20,1 a 40	40,1 a 60
0 a 50	0,773 A c	1,001 A a	0,865 A b	0,695 B d
51 a 100	0,739 A b	0,946 A a	0,799 B b	0,652 C c
101 a 150	0,737 A c	0,978 A a	0,886 A b	0,738 A c
151 a 200	0,739 A c	1,007 A a	0,875 A b	0,747 A c
Média (MPa)	0,747	0,983	0,856	0,708
DMS	0,073	0,081	0,053	0,036
CV (%)	43,23	36,43	27,54	22,43

*Médias seguidas por letras distintas indicam diferenças significativas pelo teste de DMS ($p < 0,05$). Letras maiúsculas comparam as distâncias na mesma profundidade (Coluna), e as letras minúsculas comparam as profundidades para a mesma distância (Linha). DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação.

Tabela 4. Parâmetros dos semivariogramas ajustados para a resistência do solo a penetração no sistema de toras curtas.
Table 4. Parameters of semivariogram adjusted for resistance to penetration in the short log system.

Distância de extração (m)	Profundidade do solo (cm)	Modelo	C_0	$C_0 + C$	A	R^2	IDE	GDE
0 a 50	0 a 10	Exp	$3,09.10^{-1}$	$1,28.10^{-1}$	3,00	0,328	0,760	For
	10,1 a 20	Exp	$1,00.10^{-1}$	$2,03.10^{-1}$	14,63	0,004	0,506	Mod
	20,1 a 40	Exp	$3,92.10^{-2}$	$7,85.10^{-2}$	21,33	0,978	0,501	Mod
	40,1 a 60	Exp	$3,14.10^{-3}$	$2,20.10^{-1}$	3,33	0,958	0,857	For
51 a 100	0 a 10	Lin	$9,27.10^{-2}$	$1,32.10^{-1}$	-	0,255	0,704	Mod
	10,1 a 20	Lin	$1,00.10^{-1}$	$1,67.10^{-1}$	-	0,262	0,718	Mod
	20,1 a 40	Lin	$4,47.10^{-1}$	$6,20.10^{-2}$	-	0,290	0,721	Mod
	40,1 a 60	Lin	$1,58.10^{-2}$	$2,22.10^{-2}$	-	0,341	0,715	Mod
101 a 150	0 a 10	Lin	$6,93.10^{-2}$	$1,21.10^{-1}$	-	0,044	0,573	Mod
	10,1 a 20	Lin	$7,88.10^{-1}$	$1,43.10^{-1}$	-	0,210	0,552	Mod
	20,1 a 40	Lin	$5,09.10^{-2}$	$7,10.10^{-2}$	-	0,010	0,717	Mod
	40,1 a 60	Exp	$1,35.10^{-1}$	$3,57.10^{-1}$	6,55	0,515	0,378	Mod
151 a 200	0 a 10	Exp	$1,06.10^{-2}$	$8,20.10^{-2}$	2,81	0,169	0,129	Fra
	10,1 a 20	Lin	$5,92.10^{-2}$	$1,04.10^{-1}$	-	0,077	0,569	Mod
	20,1 a 40	Lin	$5,24.10^{-1}$	$8,60.10^{-2}$	-	0,017	0,610	Mod
	40,1 a 60	Esf	$2,20.10^{-1}$	$4,51.10^{-1}$	21,44	0,050	0,487	Mod

Exp = modelo exponencial; Esf = modelo esférico; Lin = modelo linear; C_{001}

O efeito pepita (C_0), representa a variabilidade não explicada, considerando a distância de amostragem utilizada (VIEIRA, 2000). Neste trabalho, os valores variaram de $3,14.10^{-4}$ na camada de 40,1 a 60 cm na distância de 0 a 50 m a $7,88.10^{-1}$ na camada de 10,1 a 20 cm e distância de 100 a 150 m. Porém, para a maioria das profundidades avaliadas nas distâncias de 50 a 200 m, verificou-se a existência do efeito pepita puro, que segundo Mcbratney e Webster (1986), este é um parâmetro importante do semivariograma, pois indica uma variabilidade não explicada considerando a distância de amostragem utilizada. Logo se pode dizer que apesar da grande proximidade dos pontos de RSP coletados os valores apresentam alta heterogeneidade em seus valores.

O alcance (a) indica a distância, em metros, do limite entre pontos correlacionados entre si, sendo que os pontos coletados com distâncias maiores que os alcances são considerados independentes e, para sua análise, pode-se utilizar a estatística clássica (VIEIRA, 2000). Portanto, considerando-se que a distância máxima entre os valores foi de 2 m, e que o alcance da dependência espacial na classe de 0 a 50 m variou de 3 a 21,33 m, na classe de distância de 50 a 100 m, os valores não apresentaram alcance por causa do modelo ajustado. Na distância de 100 a 150 m, apenas a camada de 40,1 a 60 cm apresentou alcance de 6,55 m, enquanto na distância de 150 a 200 m, a camada de 0 a 10 cm apresentou um alcance de 2,81 m, e a camada de 40,1 a 60 cm, alcance de 21,44 m.

O Índice de Dependência Espacial (IDE) determina o grau de dependência espacial, ou seja, o quanto da variância espacial está presente na variância total da amostra, podendo ocorrer variância espacial nula (0,00), fraca (0,00 – 0,25), moderada (0,25 – 0,75) e forte (> 0,75) (GS+, 2000).

Portanto, pode-se dizer que na classe de distância de 0 a 50 m, a camada superficial (0 a 10 cm) e subsuperficial (40,1 a 60 cm) apresentam valores 0,760 e 0,857, respectivamente, considerado forte o grau de dependência espacial (GDE), enquanto que nas camadas de 10,1 a 20 e 20,1 a 40 cm, com 0,506 e 0,501, respectivamente, o GDE foi considerado moderado. Na classe de distância de 51 a 100 m, o IDE variou de 0,704 a 0,721 nas quatro camadas avaliadas, correspondendo um GDE moderado. Na classe de distância de 101 a 150, o IDE variou de 0,378 a 0,717, considerando o GDE moderado para todas as camadas do solo, enquanto na classe de 151 a 200 m, o IDE na primeira camada foi de 0,129, apresentando um GDE fraco, e nas demais camadas o IDE variou de 0,487 a 0,610, com GDE moderado.

Para obter resultados confiáveis de estimação com o método da Krigagem, devem ser utilizados os critérios para validação dos modelos do semivariograma que apresentar R^2 igual ou maior a 0,5. Portanto, somente as camadas 20,1 a 40 e 40,1 a 60 cm, na distância de 0 a 50 m, e a camada de 40,1 a 60 cm na distância de 101 a 150 m, apresentaram valores confiáveis. Porém, de acordo com GS+ (GS+, 2000), este não é um bom parâmetro para a seleção do melhor modelo. Desta forma, para realizar a krigagem ordinária dos dados, selecionou-se o modelo, que se apresenta com maior valor de IDE e alcance, obtendo assim, os mapas temáticos dessas seções horizontais.

Na Figura 2 podem ser visualizados os mapas temáticos construídos com base nos valores estimados por krigagem e dos parâmetros dos semivariogramas ajustados, enquanto na Tabela 5 são apresentados os valores percentuais da área, dentro de cada classe de valores de RSP.

Para todas as classes de distâncias e profundidades estudadas, a área apresentou maior percentual dentro da classe de 0,6 a 0,9 MPa, porém observa-se que na classe de distância de 0 a 50 m, onde houve a maior intensidade de tráfego, os valores de RSP chegam a ultrapassar o valor crítico de 2 Mpa. Além disso, é possível identificar a área trafegada pelas máquinas em ambos os ramais onde foi obtida a resistência do solo à penetração.

A compactação na linha dos rodados é visível desde a camada superficial de 0 a 10 cm até a profundidade de 20,1 a 40 cm. Nota-se que os valores são maiores na camada de 10,1 a 20 cm, sendo, a camada de maior ocorrência da compactação do solo. Este comportamento, pode ser explicado pela tendência das pressões normais à superfície de compressão concentrar-se ao redor do eixo vertical abaixo do centro da carga aplicada, causando a plasticidade do solo.

Tal resultado obtido está de acordo com o estudo realizado por Cechin (2007), que ao determinar o impacto provocado na RSP pela colheita de madeira por um *Feller* e um *Skidder* em plantio de pinus, verificou que a compactação do solo ocorreu no sentido vertical dos 8,0 aos 50,0 cm após a operação de arraste.

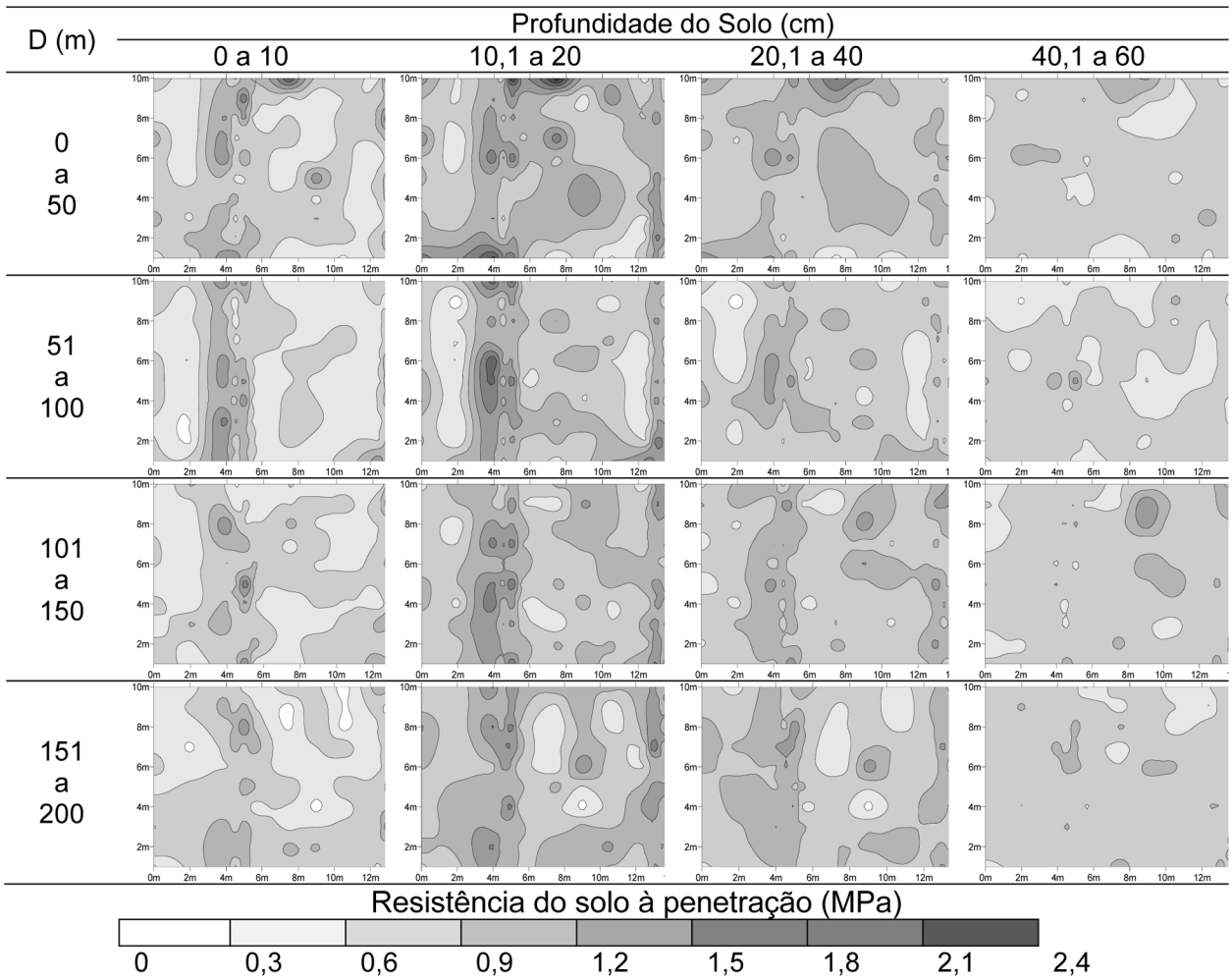

Figura 2. Mapa da distribuição espacial da resistência do solo à penetração (MPa) nas diferentes distâncias de extração e profundidades do solo. D = Distância de extração (metros).

Figure 2. Map of the spatial distribution of soil penetration resistance (MPa) at different extraction distances and soil depths.

Tabela 5. Percentil da área estudada dentro de cada classe de RP, nas distâncias da trilha de tráfego e profundidades.

Table 5. Percentile of the study area, within each class of soil penetration resistance in the traffic path distances and depths.

Distância de extração (m)	Profundidade do solo (cm)	Classes de Resistência do solo à penetração (MPa)							
		>0,0	>0,3	>0,6	>0,9	>1,2	>1,5	>1,8	>2,1
		Percentual da área estudada (%)							
0 a 50	0 a 10	0,16	32,63	49,90	14,39	2,43	0,41	0,06	0,02
	10,1 a 20	0,04	7,65	42,24	12,04	1,78	0,47	0,20	0,06
	20,1 a 40	0,25	3,65	62,27	30,98	2,25	0,57	0,02	0,00
	40,1 a 60	0,02	15,35	80,90	3,65	0,08	0,00	0,00	0,00
51 a 100	0 a 10	0,57	44,76	36,18	15,25	3,14	0,10	0,00	0,00
	10,1 a 20	0,31	14,18	45,73	29,45	7,98	1,88	0,47	0,00
	20,1 a 40	0,31	13,20	66,25	19,29	0,94	0,00	0,00	0,00
	40,1 a 60	0,08	26,10	72,94	0,82	0,06	0,00	0,00	0,00
101 a 150	0 a 10	0,06	38,88	48,96	10,12	1,41	0,55	0,02	0,00
	10,1 a 20	0,00	5,20	49,02	34,65	10,08	1,06	0,00	0,00
	20,1 a 40	0,00	3,80	63,35	29,92	2,69	0,22	0,02	0,00
	40,1 a 60	0,00	9,45	81,67	7,76	1,12	0,00	0,00	0,00
151 a 200	0 a 10	1,63	36,43	46,86	13,65	1,43	0,00	0,00	0,00
	10,1 a 20	0,12	6,53	38,96	40,67	13,29	0,43	0,00	0,00
	20,1 a 40	0,12	7,75	57,57	33,27	1,29	0,00	0,00	0,00
	40,1 a 60	0,06	6,76	88,43	3,96	0,47	0,24	0,08	0,00

CONCLUSÕES

O tráfego do *harvester* e *forwarder* proporcionou maior incremento na resistência do solo à penetração nas linhas dos rodados das máquinas, com maior variabilidade na profundidade de 10 a 20 cm.

O teste de DMS de Fisher não detectou pontos críticos de resistência do solo à penetração, sendo que os valores médios não apresentaram variações ao longo das trilhas de tráfego das máquinas e não atingiram valores críticos ao desenvolvimento das plantas.

Os métodos geoestatísticos aplicados mostraram viáveis no estudo da variabilidade espacial da compactação do solo causada pelas máquinas de colheita da madeira, podendo auxiliar na identificação de áreas compactadas e no planejamento das operações florestais.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e CAPES pelo apoio financeiro, e à empresa florestal pela cessão da área para a realização do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAVIGLIONE, J. H.; KIIHL, L. R. B.; CARAMORI, P. H.; OLIVEIRA, D. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2000. CD-ROM.

CECHIN, N. F. **Compactação de dois argissolos na colheita florestal de *Pinus taeda* L**. 2007. 136 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

DIAS JR., M. S.; LEITE, F. P.; WINTER, M. E.; PIRES, J. V. G. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um Latassolo Vermelho-Amarelo cultivado com eucalipto na região de Peçanha-MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 343-349, 2003.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: CNPS, 1997. 212 p.

GREACEN, E. L.; SANDS, R. Compaction of forest soils: a review. **Australian Journal of Soil Research**, v.18, n. 2, p. 163-189, 1980.

GS+. **GS+ Geostatistical for environmental science.** Versão 5.0, Michigan: Gamma Design Software, 2000.

LIMA, J. S. S.; OLIVEIRA, P. C.; OLIVEIRA, R. B.; XAVIER, A. C. Métodos geoestatísticos no estudo da resistência do solo à penetração em trilha de tráfego de tratores na colheita de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 931-938, 2008.

LOPES, E. S.; SAMPIETRO, J. A., PEREIRA, A. L. N., OLIVEIRA, D. Compactação de um latossolo submetido ao tráfego de *skidder* com diferentes rodados. **Floresta**, Curitiba, v. 41, n. 3, p. 471-480, 2011.

McBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 37, n. 4, p. 617-639, 1986.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F.; ZEMPULSKI, H.C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. **Manual de análise química de solo e controle de qualidade**. Londrina: IAPAR, 1992.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; HORN, R. Mecânica do solo. In: VAN LIER, Q. J. (Ed.) **Física do solo**. Viçosa: SBCS, 2010. p. 30-102.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa: SBCS, 2007. v. 5, p. 49-134.

SAMPIETRO, J. A.; LOPES, E. S. Compactação de um Cambissolo e Neossolo submetidos a diferentes intensidades de tráfego de *Feller Buncher* e *Skidder*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 265-272, 2011.

SEIXAS, F.; KOURY, C. G. G.; RODRIGUES, F. A. Determinação da área impactada pelo tráfego de *forwarder* com uso de GPS. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 63, p. 178-187, 2003.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 399-406, 2004.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 573-581, 1998.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In. NOVAES, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E G. R. **Tópicos em ciências do solo.** Viçosa: SBCS, 2000. v. 1, p. 2-54.

WHALLEY, W. R.; DUMITRU, E.; DEXTER, A. R. Biological effects of soil compaction. **Soil and Tillage Research,** v. 35, n. 1-2, p. 53-68, 1995.

Recebido em 18/03/2014
Aceito para publicação em 09/02/2015