

**DESENVOLVIMENTO, CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DO PERFILÔMETRO A LASER**Maira Laskoski¹, Túlio Eduardo Pereira², Leonardo Leonidas Kmiecik³, Luciano de Souza Ribeiro Bueno⁴ & Samir Paulo Jasper⁵¹ Engenheira Agrônoma, Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo na UFPR/Curitiba-PR, maira.maylsk@gmail.com² Graduando do curso de agronomia na UFPR/ Curitiba-PR, Setor de Ciências Agrárias (SCA), tulio.pereira@hotmail.com³ Graduando do curso de agronomia na UFPR/ Curitiba-PR, Setor de Ciências Agrárias (SCA), leonidas.km@gmail.com⁴ Químico, Doutor em Engenharia Mecânica pela PUCPR/Curitiba-PR, luciano.srbueno@gmail.com⁵ Engenheiro Agrônomo, Professor Adjunto A – UFPR/Curitiba-PR, Setor de Ciências Agrárias (SCA), samir@ufpr.br**Palavras-Chave:**desenvolvimento de equipamento
perfil do solo
triangulação tridimensional laser**RESUMO**

O objetivo deste trabalho foi desenvolver, construir e validar um perfilômetro a laser para mensurar as áreas mobilizada e elevada do solo, espessura média da camada mobilizada e o empolamento do solo obtido do resultado do trabalho de diferentes implementos e/ou máquinas. Construiu-se uma armação retangular de 1500 mm x 3000 mm, com tubos retangulares para suporte do carrinho de leitura. Este movimenta-se milimetricamente nas coordenadas x e y, para referenciar a posição do sensor a laser, que obtém a coordenada z. Para validação do perfilômetro a laser, compararam-se as variáveis de mensuração com o perfilômetro utilizado tradicionalmente em pesquisas, constituído por réguas paralelas posicionadas em suporte com perfuração equidistante ao longo de seu comprimento, através das quais deslizam hastes perpendiculares ao comprimento das réguas paralelas. As variáveis de mensuração não apresentaram significância estatística quando comparados os parâmetros recolhidos pelos diferentes perfilômetros. Em conclusão, o uso do perfilômetro proposto neste trabalho, foi o que apresentou maior agilidade na coleta, aquisição e armazenamento de dados, além de não modificar a estrutura do perfil analisado por tratar-se de um método de leitura a laser, sem contato com a amostra.

Keywords:Equipment development
soil profile
triangulation dimensional laser**DEVELOPMENT, CONSTRUCTION AND VALIDATION PROFILOMETER LASER****ABSTRACT**

The objective of this study was to develop, build and validate a laser profilometer to measure mobilized and high soil areas, average thickness of the mobilized layer and soil bulking established as a result of the work done by different implements and/or machines. A rectangular frame of 1500 mm x 3000 mm was constructed using rectangular tubes used as a support for the reading head. This part moved millimeters in the x and y coordinates to stipulate the position of the laser sensor, which measured the z coordinate. For laser profilometer validation, measurement variables were compared with the profilometer traditionally used in research. This profilometer consisted of parallel strips positioned within equidistant drillings along the length of the strips, through which perpendicular rods were also positioned. Measurement variables were not statistically significant when compared to the parameters collected by different profilometers. In conclusion, profilometer use as proposed in this work showed greater agility during work performance and data acquisition and storage, and does not modify the structure profile analyzed because this method involves laser scanning without having contact with the sample.

INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, a exploração agrícola vem gerando aceleração nos processos de degradação do solo. À medida que o solo é submetido ao uso agrícola, as propriedades físicas sofrem alterações, geralmente desfavoráveis ao desenvolvimento vegetal (SPERA et al., 2004). Para cada operação agrícola há no mercado uma vasta diversificação de implementos e/ou máquinas que possam ser empregados (ESTRADA et al., 2016). No caso dos equipamentos destinados ao preparo do solo, têm-se buscado, com avanços tecnológicos, reduzir os efeitos da mobilização que podem afeta-lo. O perfilômetro é um aparelho que fornece os valores das áreas mobilizada e elevada, espessura média da camada mobilizada e empolamento (MACHADO et al., 1993). O método de leitura empregado nos perfilômetros atuais pode ser considerado arcaico, comparado aos avanços tecnológicos. Estes equipamentos baseiam-se em estimativas bidimensionais (CARVALHO FILHO et al., 2007a), sendo a determinação de uma área com maior amplitude da superfície real, praticamente impossível devido à onerosidade temporal da leitura. Diante da necessidade de obtenção de coordenadas em profundidade, o presente trabalho objetivou desenvolver, construir e validar um perfilômetro a laser para mensurar as áreas mobilizada e empolada do solo, como a espessura média da camada mobilizada e o empolamento do solo, por meio de coordenadas tridimensionais geradas no perfilômetro a laser, de maneira prática e ágil.

MATERIAL E MÉTODOS

A execução deste estudo ocorreu no Departamento de Solos e Engenharia Agrícola (DSEA- Universidade Federal do Paraná), aliada à estrutura física e de recursos humanos do Laboratório de Adequação de Tratores Agrícolas (LATA). Os testes foram realizados na Fazenda Experimental Cangüiri (FEC), pertencente à Universidade Federal do Paraná (UFPR), entre as coordenadas geográficas: $-25^{\circ}22'38''$ e $-25^{\circ}24'46''$ de latitude sul, $-49^{\circ}09'05''$ e $-49^{\circ}06'40''$ de longitude oeste, com altitude média de 920 m.

A construção do perfilômetro se fez da seguinte maneira: O sensor óptico a laser para medir o perfil perpendicularmente à superfície do solo foi o modelo ODS 96M/V – 5070 – 421. O motor de passo empregado na movimentação linear, que transporta o sensor a laser ao longo das linhas de varredura, é um modelo NEMA 17 da Folger Technologies LLC. Esse motor de passo é híbrido, pode ser usado tanto no modo unipolar como bipolar. Possui ângulo de rotação de 1.8° (200 passos/revolução), $1,2$ A com 4 V em cada fase e um torque de $3,2$ kgf.cm e peso de 350 g. Usinagens do sistema estrutural: o processo de usinagem e construção das peças, como soldagem, acabamento, pintura e montagem do perfilômetro laser foi realizado em oficinas especializadas em solda e tornearia na região de Curitiba. Microcontrolador: O software de leitura dos dados, obtidos com o perfilômetro, foi elaborado em um microcontrolador ATmega2560, uma plataforma de prototipagem eletrônica de hardware livre e de placa única, projetada com um microcontrolador com suporte de entrada/saída embutido. Para a visualização dos dados foi criada uma linguagem de programação específica para o projeto, que tem origem em Wiring, e é essencialmente C/C++. Preparo do solo: Foi utilizado um trator da marca New Holland, modelo 7630, com potência nominal no motor de 78 kW (106 cv) de transmissão mecânica tipo dual power 16×4 . O sistema de engate utilizado foi o de três pontos, classificado em categoria II, com pinos dos braços inferiores de diâmetros de $1-1/8''$ polegadas e pino do terceiro ponto de $1''$ polegada. O implemento escolhido foi uma grade aradora intermediária modelo CRI-18-F, da marca BALDAN. O solo é um LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO álico (EMBRAPA, 2013), com textura argilosa, e área de relevo suave ondulado. O histórico da área é de cultivo de milho e intensa atividade de máquinas. Para as leituras com o perfilômetro tradicional, utilizou-se de um perfilômetro tradicional com largura útil de 300 cm, com pontos tomados de 5 em 5 cm, perfazendo um total de 50 leituras, obtidas por meio de uma trena de 3 m de comprimento, graduada milimetricamente, conforme adaptação realizada do trabalho descrito por Carvalho Filho et al. (2007a). O perfilômetro foi instalado sobre uma base previamente nivelada,

montada na direção transversal ao deslocamento do trator. Após a obtenção das 50 leituras, o perfilômetro foi deslocado na direção longitudinal, fazendo-se coincidir o ponto da última leitura da posição anterior com a primeira leitura no novo posicionamento. Obteve-se o perfil natural do solo por meio das leituras antes do preparo, e através das leituras após o preparo do solo obteve-se o perfil da superfície do solo depois de mobilizado, e o perfil interno do solo mobilizado, denominados, respectivamente, perfil de elevação e perfil de fundo. Esse último foi obtido após a retirada do solo mobilizado pelo equipamento, segundo as formas de avaliação descritas por Silva *et al.* (2002). A área mobilizada foi obtida por meio da Regra de Simpson (equação 1):

$$\int_{x_0}^{x_a} dx = \frac{h}{3} (f_0 + 4f_1 + 2f_2 + 4f_3 + 2f_4 + \dots + 2f_{n-2} + 4f_{n-1} + f_n) \quad (1)$$

em que,

$$h = \frac{x_a - x_0}{n} \quad (2)$$

sendo,

n = número de intervalos;
 f = altura das cotas, mm;
 h = distância entre cotas, cm; e
 X = número de cotas.

O índice de rugosidade superficial (equação 3) representa o produto do desvio-padrão entre os logaritmos naturais das leituras das elevações, pela altura média das elevações (ALLMARRAS *et al.*, 1966).

$$\sigma_y = \sigma_x \times hm \quad (3)$$

em que,

σ_y = estimativa do índice de rugosidade representada pelo desvio-padrão entre as alturas, mm;
 σ_x = desvio-padrão entre os logaritmos naturais das alturas; e
 hm = média das alturas, mm.

A área situada entre o perfil original e o perfil de fundo de sulco é a área de solo mobilizada, enquanto a área de elevação é aquela situada entre o perfil original e o perfil da superfície do solo após a mobilização (GAMERO & BENEZ, 1990).

O empolamento do solo (equação 4) foi determinado pela razão entre a área de elevação e a área mobilizada pelos órgãos ativos do equipamento, segundo GAMERO E BENEZ (1990).

$$Em = \frac{Ae}{Am} \times 100 \quad (4)$$

em que,

Em = empolamento, %;
 Ae = área de elevação, m²; e
 Am = área mobilizada, m².

A espessura média da camada mobilizada foi calculada por intermédio da equação 5.

$$Ec = \frac{Am}{Cp} \quad (5)$$

em que,

Ec = espessura média da camada mobilizada (m);
 Am = a área mobilizada (m²);
 Cp = comprimento do perfilômetro (m).

Montagem da estrutura do perfilômetro a laser: O projeto foi auxiliado pelo programa computacional SOLID EDGE® para a realização e visualização da estrutura, que conta com uma base retangular de ferro galvanizado, e dimensões de 3000 mm x 1500 mm. Para a movimentação linear, foram instalados 2 (dois) eixos retificados de 16 mm de diâmetro, fixados por 4 (quatro) suportes de eixo para guias lineares de 16 mm. A movimentação paralela conta com 4 (quatro) rolamentos lineares de 16 mm de diâmetro, suportados por 4 (quatro) mancais de alumínio, chamados comumente de pillow block. Esses rolamentos foram interligados por uma correia dentada de borracha, através de polias

dentadas fixadas em uma extremidade ao motor de passo, e em outra por um mancal suportado. Para a movimentação transversal utilizou-se 2 (dois) rolamentos lineares e dois mancais de alumínio. Com o sensor laser fixado entre os dois mancais e com cálculos sincronizados entre o diâmetro da polia e o passo do motor deferido na programação, obtém-se uma precisão de movimentação entre 500 mm até alcançar o tamanho de 1500 mm, o tamanho total da barra (Figura 1).

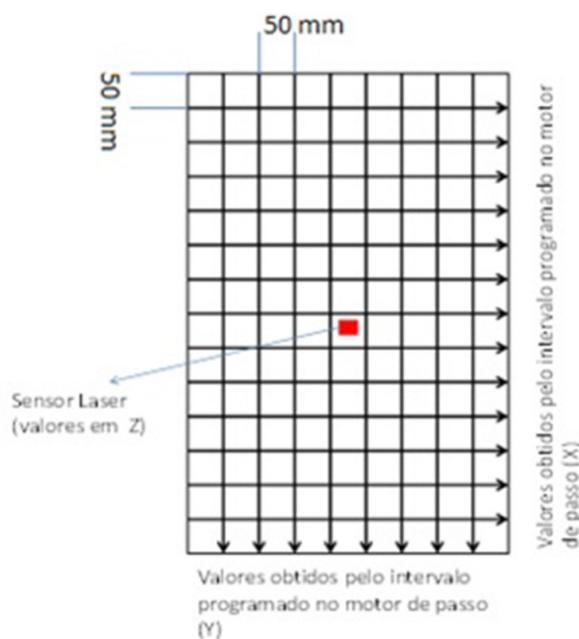


Figura 1. Esquemática do perfilômetro a laser.

A primeira etapa da programação do sistema de aquisição de dados foi especificar o tipo de sinal proveniente dos sensores a serem utilizados nos ensaios. Posteriormente, foi definida a frequência com que os dados foram coletados e armazenados. A frequência de aquisição foi determinada em função do tamanho da malha de amostragem especificada, bem como através da velocidade de deslocamento do sensor laser na linha de varredura, que foi de 50 mm.s^{-1} . Dessa maneira, para construção de uma malha regular de pontos de 50 por 50 mm, a frequência de aquisição de dados foi estabelecida em 1 s. O programa foi transferido do microcomputador para o microcontrolador por meio de um cabo USB 2.0 BM/AM. Foram feitas as medidas com o equipamento, de maneira que o sensor de distância fosse mantido perpendicular à superfície analisada, através de um sistema

de ajuste individual dos pés de apoio, onde são fixados no solo e são facilmente regulados e nivelados para auxiliar na correta medição. Foram utilizados níveis de bolha para a geração de um plano horizontal de referência. O delineamento experimental utilizado foi de cinco blocos ao acaso com cinco repetições. Os dois tratamentos estavam relacionados em comparar a metodologia empregada tradicionalmente no perfilômetro descrito por Carvalho Filho et al. (2007a), com o perfilômetro a laser desenvolvido no presente trabalho.

Para teste de significância, a análise de variância (ANOVA) foi utilizada para comparar os diferentes parâmetros avaliados, sendo as médias submetidas ao Teste “*t-student*”, com emprego do software Sisvar (FERREIRA, 2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O perfilômetro foi desenvolvido de acordo com a necessidade de obtenção de coordenadas em profundidade, em que, com este equipamento, gerou-se uma localização no espaço com três coordenadas cartesianas, ou seja, seu posicionamento em relação aos eixos X, Y e Z. As superfícies dos corpos prova e as superfícies dos perfis de solos analisados foram digitalizadas pelo equipamento construído. Sucessivas varreduras em trajetória retilíneas foram executadas com incrementos equidistantes em um sistema de posicionamento longitudinal, de maneira a produzir uma malha regular de coordenadas em profundidade produzindo uma superfície tridimensional.

A obtenção da reta, a partir de regressão linear através dos dados levantados, gerou uma correção no fator multiplicador, com a transformação do sinal do sensor (pulsos) em distância (cm) (Figura 2). O coeficiente angular encontrado foi de 0,053, a regressão apresentou um coeficiente de correlação com $R^2 = 0,99964$, mostrando uma linearidade do sensor. A equação possibilitou converter os pulsos recebidos do sensor a uma posição em centímetros.

Os valores médios referentes à área empolada, área mobilizada, espessura da camada média mobilizada e a porcentagem de empolamento para cada equipamento (tradicional e a laser) encontram-se na Tabela 1 e mostram-se sem

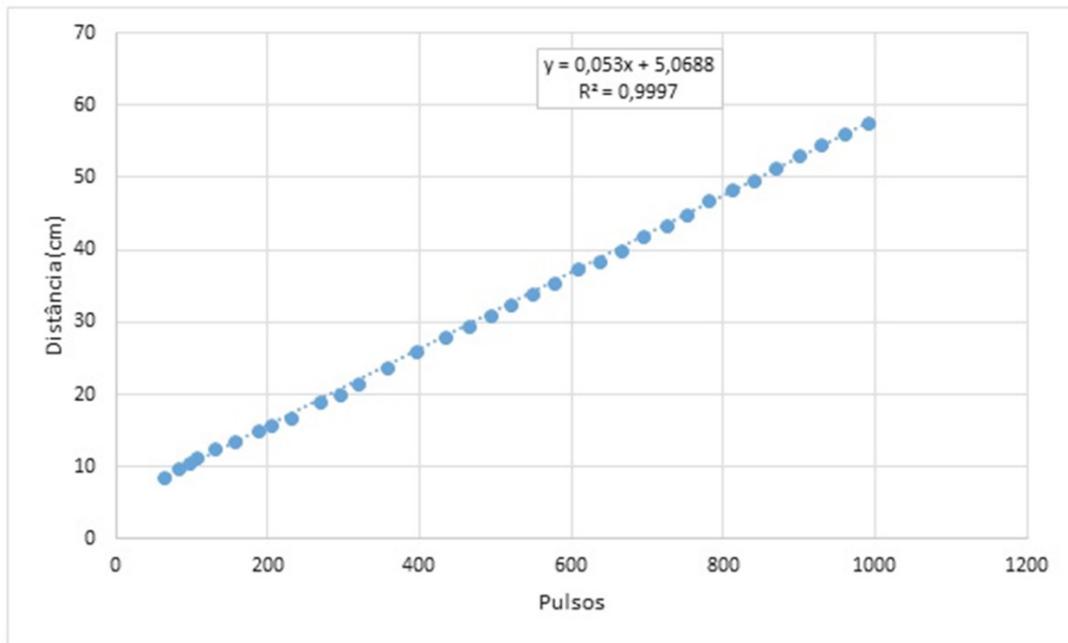


Figura 2. Reta e equações de calibração do sensor laser ods 96m/v – 5070 – 421.

Tabela 1. Síntese da análise de variância e do teste de médias para área empolada, área mobilizada, espessura média da camada mobilizada e empolamento do solo

Perfilômetro (P)	Área Empolada (m ²)	Área Mobilizada (m ²)	Espessura Média da Camada Mobilizada (m)	Empolamento (%)
Laser	0,16	0,24	0,08	56
Tradicional	0,22	0,27	0,09	59
Teste F				
P	0,21 NS	0,13 NS	0,24 NS	0,01 NS
CV (%)	98,87	54,61	65,68	73,05

Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem, entre si, pelo “teste t”, a 5% de probabilidade. NS: Não significativo ($P < 0,05$); *: Significativo ($P < 0,05$) e **: Significativo ($P < 0,01$). CV %: Coeficiente de variação.

relevância estatística.

Comparando-se a área elevada obtida com o uso do perfilômetro tradicional e o equipamento desenvolvido (Figura 3), verifica-se que não houve significância estatística na diferença das médias dos valores. A diferença verificada entre os dois perfilômetros, na área mobilizada e na área empolada, uma vez que se está trabalhando com o mesmo implemento de preparo do solo, pode ser explicada pelo erro de leitura do operador, e/ou, o fato das hastes enterrarem no solo, superestimando o valor. A espessura média da camada mobilizada

obtida pelo perfilômetro a laser obteve uma diferença de apenas 11% em relação ao valor obtido pelo perfilômetro de madeira, 0,08 m contra 0,09, considerado não significativo estatisticamente. Magno Júnior (2012), semelhantemente, no preparo de solo com grade aradora, não encontrou diferenças significativas nas áreas elevadas do solo. Por outro lado, Carvalho Filho *et al.* (2007a) encontraram diferenças com significância estatística nos valores de área de elevação, isto é justificado pelo fato de os autores terem utilizado diferentes implementos de preparo do solo. No presente trabalho, os

valores de área mobilizada, obtidos com ambos os perfilômetros, estão próximos dos valores citados por Carvalho Filho et al. (2007a) e Coan (1995), no preparo de solo com grade aradora.

As porcentagens de empolamento do solo, obtidas pelos dois equipamentos, se mantiveram muito próximas: 59% para o perfilômetro de madeira e 56% para o perfilômetro a laser, variando 6%, logo, não obtendo uma significância estatística. Carvalho Filho et al. (2007b) obtiveram uma porcentagem de empolamento muito parecida com as obtidas pelos perfilômetros utilizados neste trabalho, por se tratar de um solo sem cobertura e altamente compactado. Rosa et al. (2011) encontraram valores maiores de elevação de solo nas áreas onde houve preparo de solo com compactação adicional. Magno Júnior (2012) encontrou valores médios de empolamento próximos de 120%, sem diferença estatística significativa. As altas porcentagens de empolamento do solo, verificados

pelo autor, favorecem o contato solo-semente, principalmente para culturas de sementes menores. O alto coeficiente de variação entre as médias dos parâmetros analisados ocorreu por fatores externos, como a instabilidade na velocidade do trator em operação. Devido ao grau de dificuldade em operar o trator entre o espaçamento previamente delineado por balizas, tiveram que ser tomadas precauções para que não ocorressem quedas e modificações nesses instrumentos. A mudança constante na altura do implemento em relação ao solo também foram fatores que contribuíram na análise de um alto coeficiente de variação.

Em todos os parâmetros avaliados neste trabalho, não ocorreram significância entre os equipamentos estudados, sugerindo que o uso do perfilômetro a laser trará maior agilidade na leitura e aquisição de dados, gerando um ganho considerável em tempo na mensuração dos parâmetros propostos.

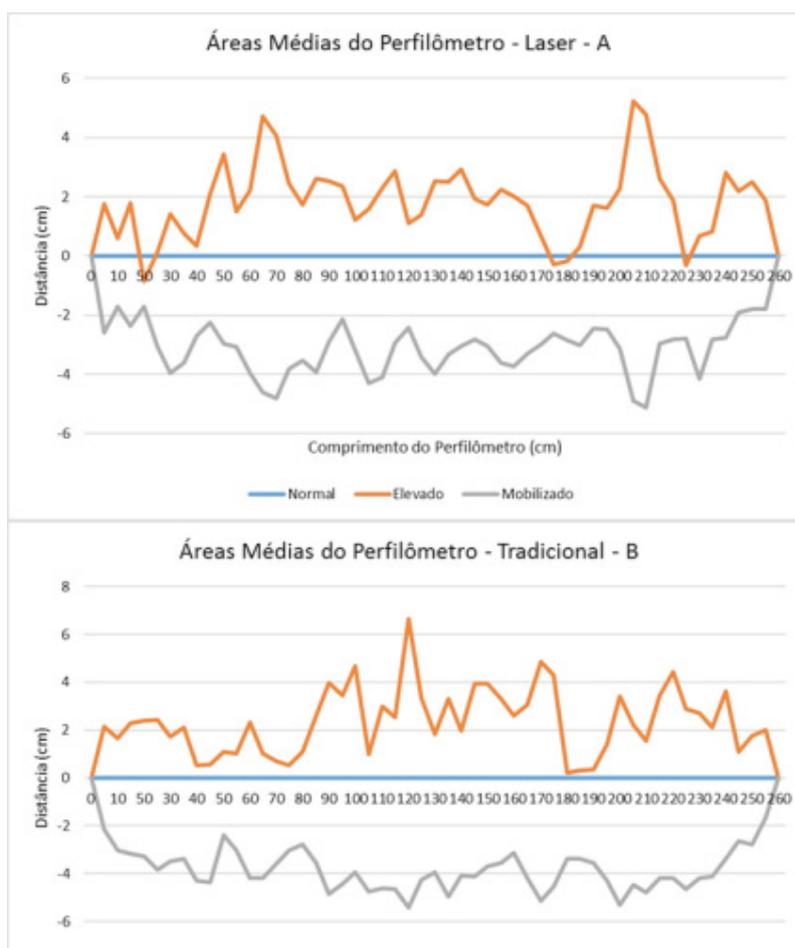


Figura 3. Áreas médias empolada e mobilizada para os perfilômetros a laser (A) e tradicional (B).

CONCLUSÕES

- O objetivo proposto neste trabalho - criar, desenvolver e validar um novo equipamento de mensuração das áreas de elevação, mobilização, espessura média da camada média mobilizada e porcentagem de empolamento -, foi atendido.
- Este novo perfilômetro a laser, por se tratar de um método de mensuração sem contato com a amostra, não modificará a estrutura do perfil do solo analisado, trazendo-nos uma maior confiabilidade nos dados obtidos.
- Além de gerar maior agilidade e praticidade na coleta, obtenção e armazenamento dos dados, é possível construir esse perfilômetro com tecnologias acessíveis e um projeto mecânico de baixo custo e fácil execução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLMARAS, R.R.; BURWELL, R.E.; LARSON, W.E.; HOLT, R.F.; NELSON, W.W. *Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage*. Washington, USDA, 1966. 22p. (Conservation Research Report, 7).
- CARVALHO FILHO, A.; CENTURION, J.F.; SILVA, R.P.; FURLANI, C.E.A.; CARVALHO, L.C.C. Métodos de preparo do solo: alterações na rugosidade do solo. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, SP, v.27, n.1, p. 229-237, 2007a.
- CARVALHO FILHO, A.; SILVA, R.P.; CENTURION, J.F.; CARVALHO, L.C.C.; LOPES, A. Agregação de um Latossolo vermelho submetido a cinco sistemas de preparo do solo em Uberaba-MG. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.1, p 317-325, jan-2007b.
- COAN, O. Sistemas de preparo de solo: efeitos sobre a camada mobilizada e no comportamento das culturas do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) e do milho (*Zea mays* L.), conduzidas em rotação. 1995. 138 f. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1995.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3. Ed. Brasília: Embrapa, 2013. P. 32, p. 40, p. 44, p. 73.
- ESTRADA, J.S.; SCHLOSSER, J.F.; FARIAS, M.S.; MARTINI, A.T.; SANTOS, G.O. Massa dos tratores agrícolas comercializados no mercado brasileiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.47, n.2, p 1390+, 2016.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**. v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.
- GAMERO, C.A.; BENEZ, S.H. **Avaliação da condição do solo após a operação de preparo**. In: *IV Ciclo de estudos sobre mecanização agrícola*, 1., 1990, Jundiaí. Anais... Jundiaí: Fundação Cargill, 1990. p.12-21.
- JÚNIOR, R.G.M.; D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2012. **Avaliação de sistemas de preparo do solo para a cultura da cenoura (*Daucus Carota* L.) Visando à colheita mecanizada**. Orientador: Luciano Baião Vieira. Coorientadores: Haroldo Carlos Fernandes, Alberto Carvalho Filho e Paulo Roberto Cecon.
- MACHADO, R. L. T. Turatti & A. S. Alonço. Construção e utilização de um perfilômetro. **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 24. p. 171- 72, 1993. Resumos.
- ROSA, D.P.; REICHERT, J.M.; MENTGES, M.I.; BARROS, C.A.P.; REINERT, D.J.; VIEIRA, D.A. Cultivo mínimo: efeito da compactação e deformação abaixo da atuação da ponteira do subsolador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.21, n.1, p. 1199, nov-2011.
- SILVA, R.P.; CARVALHO FILHO, A.; COAN, O. Efeitos do arado de aivecas e da enxada rotativa na camada mobilizada do solo. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, SP, v.22, n.1, p. 110-117, 2002.
- SPERA, S.T.; SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S.; TOMM, G.O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.533-542, 2004.