

Capacidade de suporte de carga de Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização no solo

Oswaldo Julio Vischi Filho⁽¹⁾, Zigomar Menezes de Souza⁽¹⁾, Reginaldo Barbosa da Silva⁽²⁾, Camila Cassante de Lima⁽²⁾, Danilo de Moraes Gomes Pereira⁽²⁾, Márcio Emanuel de Lima⁽³⁾, Allan Charles Mendes de Sousa⁽¹⁾ e Gustavo Soares de Souza⁽¹⁾

⁽¹⁾Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Departamento de Água e Solo, Avenida Cândido Rondon, nº 501, Barão Geraldo, CEP 13083-875 Campinas, SP, Brasil. E-mail: ovischi@gmail.com, zigomarms@feagri.unicamp.br, allancharles2@hotmail.com, gsdsouza@hotmail.com ⁽²⁾Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Departamento de Solos, Campus de Registro, Avenida Nelson Brihi Badur, nº 430, Vila Tupy, CEP 11900-000 Registro, SP, Brasil. E-mail: rbsilva@registro.unesp.br, camila.cassante@gmail.com, danilo_mgp@hotmail.co.uk ⁽³⁾Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo, Coordenadoria de Defesa Agropecuária, Avenida Brasil, nº 2.340, CEP 13070-178 Campinas, SP, Brasil. E-mail: marcio@cda.sp.gov.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi determinar a capacidade de suporte de carga (CSC) de Latossolo Vermelho e, por meio de modelos de compressibilidade, relacioná-la às interações rodado-solo em sistema de manejo com um e três ciclos de cultivo de cana-de-açúcar, com colheita mecanizada. As avaliações da CSC foram realizadas em amostras de solo indeformadas, coletadas na linha de plantio e no canteiro, em quatro camadas: 0,00–0,10, 0,10–0,20, 0,20–0,30 e 0,30–0,40 m. Determinou-se a área de contato dos rodados com o solo, para a estimativa da pressão exercida pelas máquinas agrícolas no solo. As pressões de preconsolidação foram usadas para determinar a CSC. O sistema com três ciclos apresentou maior CSC do que o sistema com apenas um ciclo. A capacidade de suporte de carga do solo avaliado na faixa de friabilidade é maior que as pressões de contato aplicadas ao solo pelos rodados das máquinas agrícolas estudadas.

Termos para indexação: área de contato, compactação do solo, compressibilidade do solo, curva de compressão, pressão de contato, pressão de preconsolidação.

Load support capacity of an Oxisol cultivated with sugarcane and mechanization effects on the soil

Abstract – The objective of this work was to determine the load support capacity (LSC) of an Oxisol and, through compressibility models, relate it to wheel-soil interactions under management systems with one and three sugarcane crop cycles, with mechanized harvest. LSC evaluations were carried out on undisturbed soil samples, collected at planting row and bed, in four layers: 0.00–0.10, 0.10–0.20, 0.20–0.30, and 0.30–0.40 m. The contact area between wheels and soil was determined in order to estimate the contact pressure by agricultural machinery on the soil. Pre-consolidation pressures were used to determine LSC. The system with three cycles showed higher LSC than the system with only one cycle. The load support capacity of the soil evaluated in the range of friability is greater than the contact pressures applied to the soil by the wheels of the studied agricultural machines.

Index terms: contact area, soil compaction, soil compressibility, compression curve, contact pressure, pre-consolidation pressure.

Introdução

O setor sucroenergético, em razão das grandes extensões de terra, requer mecanização agrícola altamente tecnificada, do plantio à colheita, com máquinas modernas e versáteis que possam realizar as suas funções com baixos custos e máxima eficiência, para fornecer matérias primas e produtos de qualidade ao agricultor e à agroindústria (Souza et al., 2012). Contudo, o tráfego de máquinas nos canaviais ao longo

de sucessivos ciclos de cultivo, muitas vezes sem considerar o teor de água no solo, tem contribuído para o processo de compactação (Severiano et al., 2010; Cavichioli et al., 2012; Souza et al., 2014).

A pressão de preconsolidação do solo é um indicador da máxima carga à qual o solo foi submetido no passado (Dias Junior, 2000; Silva et al., 2010) e pode ser obtida a partir da curva de compressão do solo. A pressão de preconsolidação é considerada como um indicador da qualidade estrutural do solo (Severiano et al., 2010) e é

uma ferramenta capaz de identificar a real degradação nos solos (Iori et al., 2012). A aplicação sobre o solo de pressões menores do que a pressão de preconsolidação causa deformações pseudoelásticas e recuperáveis, enquanto a aplicação de pressões maiores causa deformações plásticas e não recuperáveis, o que resulta na degradação da estrutura do solo (Severiano et al., 2010; Souza et al., 2012).

A capacidade de suporte de carga (CSC) do solo representa uma função que relaciona a pressão de preconsolidação do solo ao teor de água no solo, de acordo com a equação: ($\sigma_p = f(U)$), que indica a máxima pressão que um solo pode suportar a diferentes teores de água (Silva et al., 2006, 2010; Souza et al., 2012). A compactação de forma não recuperável ocorre quando a pressão de contato dos rodados ultrapassa a CSC. Dessa forma, quantificar as pressões de contato aplicadas no solo e a CSC contribui para melhorar o gerenciamento das máquinas e para estabelecer estratégias de prevenção da compactação do solo (Silva et al., 2003). Altas pressões aplicadas ao solo alteram seus atributos físicos. Isso resulta em maior grau de compactação, o que diminui o desenvolvimento radicular e a produtividade da cultura da cana-de-açúcar (Souza et al., 2012). A compactação da camada superficial do solo está relacionada à área de contato pneu-solo e à pressão interna dos pneus agrícolas, e a compactação em profundidade está diretamente relacionada à carga radial (Botta et al., 2008). Assim, o dimensionamento adequado das máquinas e dos pneus agrícolas diminui o carregamento mecânico sobre o solo e evita a compactação adicional, o que é mais vantajoso do que ter de realizar a descompactação periodicamente (Hakansson & Reeder, 1994).

O objetivo deste trabalho foi determinar a CSC de Latossolo Vermelho e, por meio de modelos de compressibilidade, relacioná-la às interações rodado-solo em sistema de manejo com um e três ciclos de cultivo de cana-de-açúcar, com colheita mecanizada.

Material e Métodos

O estudo foi realizado em áreas de produção comercial de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.) pertencentes à Usina São Martinho, no Município de Pradópolis, SP (21°19'13"S, 48°07'14"W). O clima da região, conforme a classificação de Köppen, é do tipo Cwa, subtropical úmido, com temperaturas no

mês mais quente superiores a 22°C e no mês mais frio inferiores a 18°C. A precipitação pluvial média anual é de 1.408 mm, com chuvas mais concentradas no período de novembro a março.

O experimento foi desenvolvido em duas áreas adjacentes, com relevo suave ondulado, cultivadas com cana-de-açúcar, com colheita mecanizada e sem queima. Foram avaliados dois sistemas de manejo (tratamentos): CM1, colheita mecanizada da cultivar CTC20 de cana-de-açúcar, com um ciclo de cultivo (6 anos), implantada em 2008 sobre Latossolo Vermelho eutrófico (LVe), de textura argilosa, com 442 g kg⁻¹ de argila; e CM3, colheita mecanizada da cultivar RB 855453, com três ciclos de cultivo (18 anos), implantada em 1995 sobre Latossolo Vermelho eutroférico (LVef), de textura argilosa, com 522 g kg⁻¹ de argila (Tabela 1). Os ciclos de cultivo dos canaviais duraram 6 anos, seguidos da renovação da lavoura.

Na implantação dos canaviais, o preparo do solo das áreas foi realizado com as seguintes operações: eliminação mecânica da soqueira da lavoura anterior, com uso de equipamento específico; gradagem com grade niveladora; e subsolagem até 0,45 m de profundidade. Foram aplicados 1,58 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico e 0,39 Mg ha⁻¹ de gesso agrícola antes do revolvimento do solo, bem como 20 Mg ha⁻¹ de torta de filtro (resíduo do processo industrial da cana-de-açúcar) e 1,65 Mg ha⁻¹ de adubo orgânico de aves no plantio. Após cada colheita, foi aplicado, em cada área, parcelado em duas vezes, o fertilizante formulado 22-00-18, nas doses de 0,52 e 0,45 Mg ha⁻¹, respectivamente, além de 197 m³ ha⁻¹ de vinhaça. Ao final de cada ciclo (6 anos de cultivo), na reforma das áreas, realizou-se a dessecação química da soqueira, seguida de subsolagem na profundidade de 0,45 m, sulcação e plantio.

As operações mecanizadas, que envolveram o preparo e a condução do canavial, foram realizadas com trator Magnum 235 (Case IH, Piracicaba, SP), com motor de 235 hp (172 kW), tração 4x4, massa de 14,88 Mg, pneus traseiros 710/70-R38 e dianteiros 600/65-R28, com pressão de inflação de 110 e 150 kPa, respectivamente. A colheita foi realizada com colhedora de cana-de-açúcar equipada com esteira, modelo A8800 (Case IH, Piracicaba, SP), com motor de 358 hp (262 kW) e massa de 18,30 Mg. A colhedora foi seguida por um trator Magnum 235 (Case IH, Piracicaba, SP) que traciona três transbordos VTX

14000 (Tracan, Araçatuba, SP), com três eixos e massa total de cada transbordo de 14,74 Mg.

As avaliações físico-mecânicas foram realizadas em amostras de solo com estrutura preservada, coletadas em cada uma das áreas, após a colheita da cana-de-açúcar, em agosto de 2012. As amostras foram retiradas com cilindros volumétricos de 0,0635 m de diâmetro por 0,0254 m de altura, em 15 trincheiras (0,40 m de largura por 0,60 m de comprimento e 0,50 m de profundidade), na linha de plantio e no canteiro (que corresponde a uma faixa de solo distante a 0,30 m de cada lado da linha de plantio), no centro das camadas de 0,00–0,10, 0,10–0,20, 0,20–0,30 e 0,30–0,40 m, para determinação da pressão de preconsolidação. Para os ensaios de compressibilidade, foram utilizadas 240 amostras indeformadas (2 áreas x 2 pontos de coleta x 4 camadas x 15 repetições). Amostras deformadas (n=4) foram usadas na caracterização da consistência do solo, definida pelos limites de: contração, de 0,11 kg kg⁻¹ (CM1) a 0,14 kg kg⁻¹ (CM3); plasticidade, de 0,21 kg kg⁻¹ (CM1) a 0,32 kg kg⁻¹ (CM3); e liquidez, de 0,27 kg kg⁻¹ (CM1) a 0,40 kg kg⁻¹ (CM3). Esses limites definem as faixas de: tenacidade, de <0,11 kg kg⁻¹ (CM1) a <0,14 kg kg⁻¹ (CM3); friabilidade, de 0,11–0,22 kg kg⁻¹ (CM1) a 0,14–0,34 kg kg⁻¹ (CM3); e plasticidade, de 0,21–0,29 kg kg⁻¹ (CM1) a 0,32–0,43 kg kg⁻¹ (CM3), do solo.

Para a obtenção de cada um dos modelos de compressibilidade, 15 amostras de estrutura preservada foram saturadas e, em seguida, equilibradas à temperatura ambiente, no laboratório, em cinco teores de água, ou seja, foram realizadas três repetições para

cada teor de água, o qual variou da condição tenaz à saturada (Tabela 2). Essas condições extremas de umidade são recomendadas em estudos dessa natureza por Dias Junior (1994) e Silva et al. (2010).

A pressão de preconsolidação foi quantificada por meio do ensaio de compressão uniaxial, tendo-se aplicado cargas de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa às amostras indeformadas. Cada pressão foi aplicada até atingir 90% da deformação máxima, e, em seguida, foi aumentada a pressão. Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados em consolidômetro automático, modelo CNTA-IHM/BR-001/07, acoplado ao programa específico que acompanha o equipamento (Silva et al., 2007). Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 105°C, até massa constante, para determinação da densidade do solo (Donagema et al., 2011). A partir da curva de compressão (densidade do solo x pressão), foi estimada a pressão de preconsolidação de cada amostra, de acordo com Dias Junior (1994).

Dezesseis curvas de compressão do solo foram obtidas para as amostras em diferentes teores de água, o que permitiu a construção do modelo de capacidade de suporte do solo. Para a obtenção de cada um dos modelos de compressibilidade, 15 amostras de estrutura preservada foram saturadas e depois equilibradas nos teores de água no solo, os quais variaram da condição tenaz à saturada. Essas condições de umidade foram sugeridas por Dias Junior (1994) e Silva et al. (2010). Os dados experimentais foram ajustados ao modelo não linear, $\sigma_p = 10^{(a+b \times U)}$ (Dias Junior, 1994), em que: σ_p é a pressão de preconsolidação do solo; a e b são os

Tabela 1. Caracterização química⁽¹⁾ e granulométrica⁽²⁾ dos Latossolos Vermelhos avaliados nas áreas dos tratamentos, nas camadas de 0,00–0,10, 0,10–0,20, 0,20–0,30 e 0,30–0,40 m.

Camada (m)	pH em CaCl ₂	pH em H ₂ O	P (mg dm ⁻³)	K -----	Ca (mmol _c dm ⁻³)	Mg -----	H+Al -----	CTC -----	V -----	MO (%)	Argila -----	Silte (g kg ⁻¹)	Areia -----
Colheita mecanizada com um ciclo de cultivo, em Latossolo Vermelho eutrófico													
0,00–0,10	4,8	5,5	4,8	5,5	3,2	0,9	3,7	8,26	55	3,4	423	160	417
0,10–0,20	4,7	5,6	15,0	0,5	3,2	0,9	3,8	8,38	53	3,6	439	162	399
0,20–0,30	4,7	5,5	9,2	0,4	2,9	0,8	3,7	7,80	42	3,4	446	167	387
0,30–0,40	4,4	5,1	3,0	0,1	1,2	0,4	4,0	5,70	30	2,1	461	160	379
Colheita mecanizada com três ciclos de cultivo, em Latossolo Vermelho eutroférico													
0,00–0,10	4,8	5,5	4,8	5,5	4,2	1,3	4,2	10,34	59	4,3	481	300	219
0,10–0,20	5,0	5,4	16,8	0,6	4,0	1,0	4,2	9,76	58	4,4	503	315	182
0,20–0,30	5,1	5,5	11,0	0,4	4,1	1,1	3,2	8,78	59	3,7	543	302	155
0,30–0,40	5,2	5,9	6,0	0,2	3,2	1,0	2,8	7,24	61	2,2	560	293	147

⁽¹⁾Métodos de análise química (Van Raij et al., 2001). ⁽²⁾Método da pipeta com baixa rotação (Camargo et al., 1986).

coeficientes da equação; e U é a unidade gravimétrica do solo. Os modelos de compressibilidade obtidos para cada sistema de manejo, após linearizados (transformação logarítmica), foram comparados a partir de Snedecor & Cochran (1989).

A quantificação da pressão de contato estática do pneu com o solo (PC) foi obtida pela relação entre a carga das máquinas (F) e a área de contato dos rodados (AC), com uso da equação: $PC = (F/AC)$, em que PC é a pressão de contato estática (kgf cm^{-2}); F é a força (kgf); e AC é a área de contato do rodado com a superfície do terreno (cm^2). A força foi determinada pela massa do trator ou do conjunto motomecanizado, transferida para o rodado avaliado (pneu ou esteira), tendo-se utilizado balanças de plataforma BPV-830 (Toledo do Brasil: Indústria de Balanças Ltda., São Bernardo do Campo, SP). A transferência de peso das máquinas quando tracionadas, que ocorre principalmente nos tratores, foi desconsiderada no caso dos tratores, em razão do uso de lastragem.

A área de contato dos rodados foi determinada em superfície rígida (asfalto) e no solo com e sem cobertura (palhada de cana-de-açúcar). No asfalto, colocou-se um filme de papel sob o rodado, cujo entorno foi pintado com tinta spray, e, no solo, utilizou-se cal para pintura, que foi polvilhada em torno do pneu; em seguida, com auxílio de um hidráulico acoplado a um caminhão munck, o eixo foi levantado e a área impressa no solo foi transcrita para uma placa de plástico transparente.

Dois procedimentos foram adotados para a quantificação da área de contato. O primeiro foi o analítico, utilizado quando a área de contato apresentava formato elíptico, aqui nomeada de área de contato da elipse estimada, com base na equação de Hallonborg (1996):

$$A = \left(\frac{\pi}{4}\right) \times L \times b \times \left[1 - \left(2 \times \frac{\eta}{\pi}\right)\right],$$

em que: A é a área de contato (m^2); L é a medida do eixo maior da elipse circunscrita na área de contato (m); e b é a dimensão do eixo menor da elipse circunscrita na área de contato (m). O valor de η depende da deformação do pneu, da carga e da pressão de inflação, e pode ser nulo quando a largura da área for menor que a do pneu. Quando a largura da área foi maior que a do pneu, o valor de η foi obtido pela equação (Upadhyaya et al., 1994):

$$\eta = \left[2 \left(1 - \frac{w}{b}\right)\right]^{0,5} - \left(\frac{w}{b}\right) \left[1 - \left(\frac{w}{b}\right)^2\right]^{0,5},$$

em que: w é a largura da área de contato (m) e b é a largura do pneu (m).

O segundo procedimento, o digital, foi realizado com auxílio de câmera fotográfica de 16 megapixels, para digitalização das áreas transcritas para a placa de plástico sobre o solo, com ou sem resíduos. Com a imagem digital da área de contato, gerou-se uma elipse de tamanho aproximado ao da área de contato impressa no solo, e, com recurso computacional, obteve-se a área desta elipse. A área de contato real foi obtida por meio do programa AutoCAD (Autodesk do Brasil Ltda., São Paulo, SP), nos quais foram quantificadas as áreas de contato médias das garras (Silva et al., 2003).

Resultados e Discussão

Os parâmetros a e b dos modelos de CSC do solo para os Latossolos Vermelho argilosos avaliados variaram de 2,67 a 2,75 e de -0,56 a -1,25, respectivamente, e os coeficientes de determinação (R^2), de 0,68 a 0,95 (Figuras 1 e 2). Os valores são semelhantes aos encontrados por Silva et al. (2006), de $a=2,74$ e $b=-1,26$ ($R^2=0,88$), ao avaliar a capacidade de suporte de carga de Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiro (*Coffea* sp.) e os efeitos da mecanização agrícola no solo. Os modelos de CSC para CM1 e CM3 mostraram que os parâmetros a e b do modelo foram todos significativos (Figuras 1 e 2).

Os modelos de compressibilidade (CM1 vs. CM3) diferiram na linha de plantio apenas na camada de 0,00–0,10 m, comparados pelo teste de homogeneidade de Snedecor & Cochran (1989) (Tabela 3). Assim, independentemente do teor de água no solo, o CM3 apresentou maior pressão de preconsolidação do

Tabela 2. Limites e estados de consistência dos corpos de prova, de acordo com os cinco teores de água avaliados dos Latossolos Vermelhos.

Local de coleta ⁽¹⁾	Teor de água (kg kg^{-1})				
	1 (tenaz)	2	3	4	5 (saturado)
Colheita mecanizada com um ciclo de cultivo de cana-de-açúcar					
CT	0,05	0,11	0,16	0,21	0,27
LP	0,05	0,11	0,17	0,22	0,29
Colheita mecanizada com três ciclos de cultivo de cana-de-açúcar					
CT	0,05	0,14	0,23	0,32	0,40
LP	0,05	0,15	0,25	0,34	0,43

⁽¹⁾CT, canteiro; e LP, linha de plantio.

que o CM1 na camada superficial (Figura 1), o que indica maior compactação do solo em razão do efeito acumulativo do tráfego de máquinas no solo ao longo dos ciclos de cultivo. Contudo, nas camadas de 0,20–0,30 e 0,30–0,40 m, não houve diferença entre CM3 e CM1 nos modelos de CSC, o que indica efeito da subsolagem na linha de plantio, mesmo após três ciclos de cultivo mecanizado.

No canteiro, os modelos de CSC diferiram entre os manejos nas camadas de solo até 0,30 m (Tabela 3), com maior pressão de preconconsolidação no manejo com três ciclos com colheita mecanizada, independentemente do teor de umidade do solo (Figura 2). Esses resultados são indicativos de uma maior compactação do solo,

causada pelo contato dos rodados das máquinas agrícolas com o solo na região. Na camada de 0,30–0,40 m, os modelos não diferiram significativamente, já que a camada compactada está localizada acima dessa profundidade, o que mostra que o histórico de compactação desses solos não atingiu a profundidade de 0,30–0,40 m (Tabela 3 e Figuras 1 e 2). Resultados semelhantes foram obtidos por Severiano et al. (2010), que, ao avaliar a compactação de Latossolo Vermelho-Amarelo e Cambissolo cultivados com cana-de-açúcar, verificaram que a camada compactada do solo foi encontrada acima da profundidade de 0,30 m; portanto, essa compactação não foi considerada prejudicial, uma vez que as alterações estruturais nos

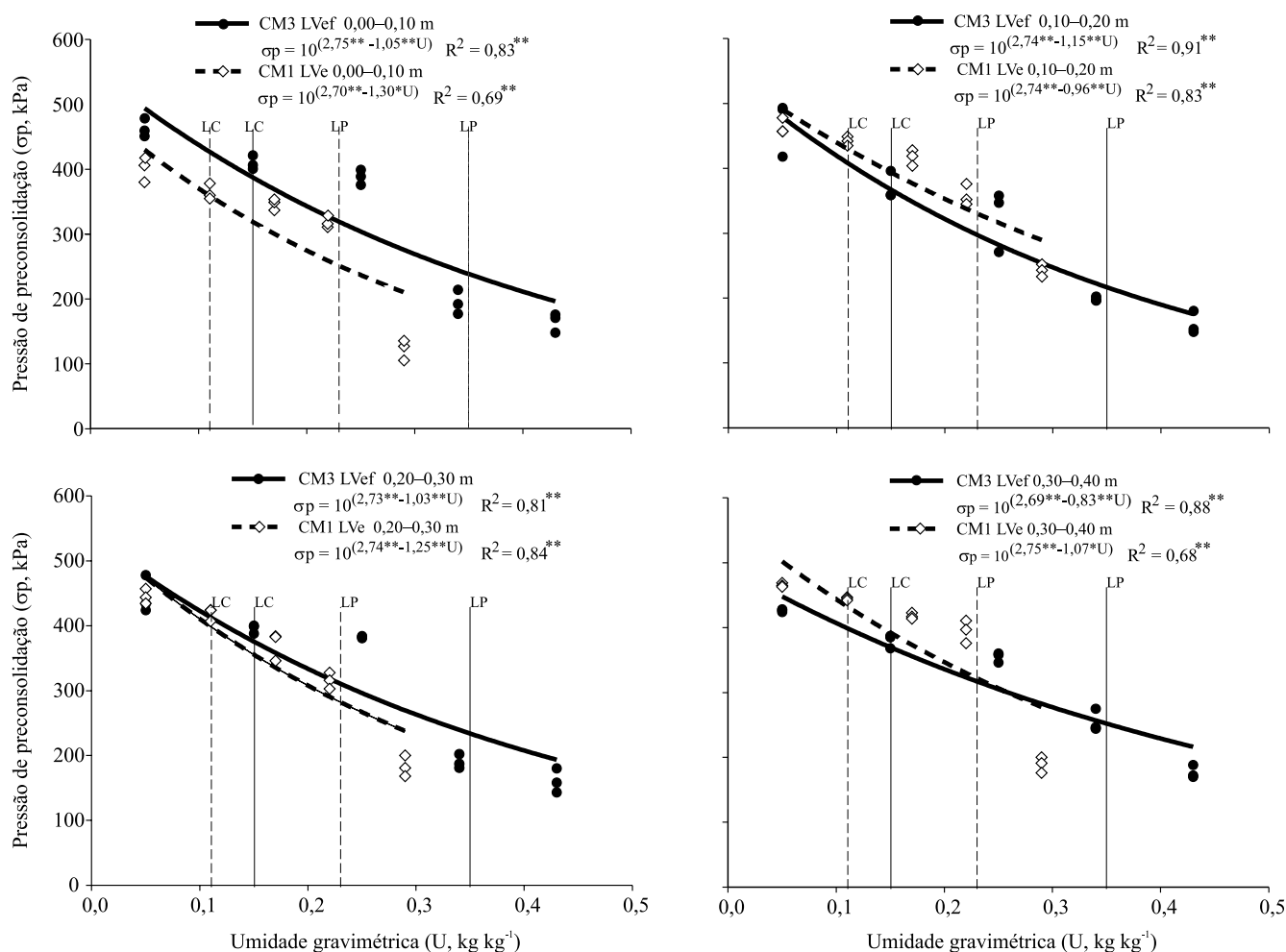


Figura 1. Modelos de capacidade de suporte de carga do solo nos sistemas de manejo com um (CM1 LVe) e três ciclos (CM3 LVe) de cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.), para a linha de plantio, nas camadas de 0,00–0,10, 0,10–0,20, 0,20–0,30 e 0,30–0,40 m de profundidade. LC, limite de contração; LP, limite de plasticidade. * e **Significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente. $n = 15$, para cada manejo e camada.

solos provavelmente não foram suficientes para limitar o desenvolvimento da soqueira de cana-de-açúcar.

A pressão de preconconsolidação, na linha de plantio, foi maior no tratamento CM3 do que no CM1, nas camadas de 0,00–0,10 e 0,20–0,30 m, e superiores ao CM1, nas camadas de 0,10–0,20 e 0,30–0,40 m (Figuras 1 e 2). Na região do canteiro, a σ_p foi maior no tratamento CM3 em todas as profundidades, o que mostra maior uniformidade no canteiro em relação à linha de plantio, provavelmente decorrente do sistema de colheita mecanizada. Pacheco & Cantalice (2011), ao analisar o trânsito de máquinas agrícolas no cultivo de cana-de-açúcar, inferiram que o manejo utilizado – 4, 14 e 30 anos de cultivo – na cultura da cana-de-açúcar

aumentou a σ_p nos horizontes Ap (0,00–0,20 m), AB (0,20–0,40 m) e Bt (0,40–0,60 m) de um Argissolo Amarelo. Souza et al. (2012), ao avaliar o sistema de manejo de cana-de-açúcar com colheita mecanizada e controle de tráfego, em Latossolo Vermelho com teor de argila de 534 g kg⁻¹, também concluíram que a maior capacidade de suporte de carga ocorreu na entrelinha, em comparação à linha de plantio, nas camadas de solo de 0,00–0,10 e 0,20–0,30 m.

A CSC do solo definida pela relação $\sigma_p f(U)$ na faixa de friabilidade, que corresponde à umidade adequada para as operações agrícolas no solo, variou de 224 a 441 kPa para CM3 e de 236 a 435 kPa para CM1 (Tabela 4 e Figuras 1 e 2). Os resultados são

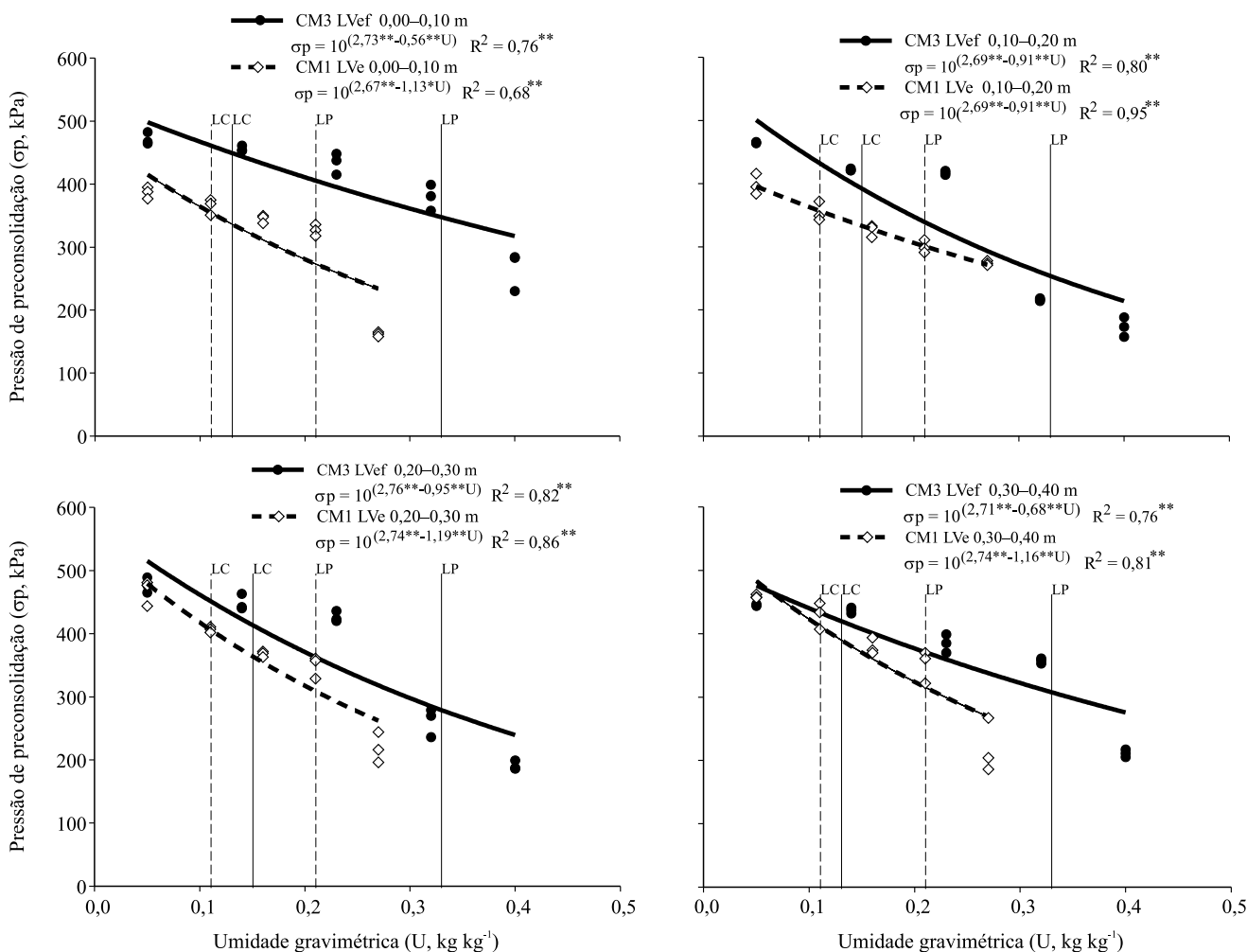


Figura 2. Modelos de capacidade de suporte de carga do solo nos sistemas de manejo com um (CM1 LVe) e três ciclos (CM3 LVe) de cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.), para o canteiro, nas camadas de 0,00–0,10, 0,10–0,20, 0,20–0,30 e 0,30–0,40 m de profundidade. LC, limite de contração; LP, limite de plasticidade. * e **Significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente. n = 15, para cada manejo e camada.

próximos aos relatados por Silva & Cabeda (2006), que estudaram os efeitos do teor de água e de sistemas de manejo com cana-de-açúcar no grau de compactação e nos parâmetros de compressibilidade de um Argissolo Amarelo coeso e observaram que a capacidade de suporte de carga na zona de friabilidade variou de 204 kPa, na camada de 0,00–0,03 m, a 234 kPa, na camada de 0,25–0,28 m.

Os resultados obtidos são indicativos de que a maior CSC ocorreu na seguinte ordem: L_{Ve} (CM3) > L_{Ve} (CM1), com exceção das camadas 0,10–0,20 e 0,30–0,40 m na linha de plantio, para as condições apresentadas nos modelos (Figuras 1 e 2). Os valores de σ_p decresceram com o aumento da umidade, o que pode ser atribuído ao manejo que induz à desagregação e a um menor contato entre as partículas primárias do solo, o que concorre para menor CSC em altos teores de umidade, como também constatado nos trabalhos de Kondo & Dias Junior (1999), Silva et al. (2006) e Pacheco & Cantalice (2011). O aumento do teor de água no solo reduz a resistência interna das partículas, uma vez que forma uma camada líquida que envolve partículas e agregados do solo, o que reduz o atrito e facilita a deformação (Araujo-Junior et al., 2011; Souza et al., 2012). Silva et al. (2006), ao analisar um Latossolo Amarelo distrófico (LAd), encontraram

valores de σ_p que variaram de 165 a 234 kPa, para os teores de água de 0,62 e 0,37 kg kg⁻¹, respectivamente, menores que os obtidos no presente trabalho (Tabela 4), principalmente o de 234 kPa, que foi o valor máximo de σ_p .

As pressões de contato rodado-solo das máquinas agrícolas variaram de 39,38 a 622,10 kPa. As pressões de contato da elipse (PCE) e real (PCR) reduziram no sentido superfície rígida > solo sem palha > solo com palha, em razão do aumento da área de contato dos rodados agrícolas com a superfície. Observou-se aumento da PCR em relação à PCE, pela redução da área de contato dos rodados. Os transbordos e os tratores (pneus dianteiros) apresentaram os maiores potenciais de compactação do solo, ao exercer maior pressão sobre a superfície do solo nas condições de

Tabela 3. Teste de significância da comparação entre as equações obtidas nos modelos de capacidade de suporte de carga do solo, para os manejos com um e três ciclos (CM1 e CM3, respectivamente) de cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.) com colheita mecanizada, na linha de plantio (LP) e no canteiro (CT), nas camadas de 0,00–0,10, 0,10–0,20, 0,20–0,30 e 0,30–0,40 m.

Local de coleta	Parâmetro do modelo		
	F ₁ ⁽¹⁾	Coefficiente angular b	Intercepto a
CM1 vs. CM3, 0,00–0,10 m			
LP	ns	ns	**
CT	ns	**	**
CM1 vs. CM3, 0,10–0,20 m			
LP	ns	ns	ns
CT	**	*	*
CM1 vs. CM3, 0,20–0,30 m			
LP	ns	ns	ns
CT	ns	ns	**
CM1 vs. CM3, 0,30–0,40			
LP	ns	ns	ns
CT	ns	ns	ns

⁽¹⁾Teste de homogeneidade dos dados. * e **Significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente. nsNão significativo.

Tabela 4. Atributos físico-mecânicos do solo para os teores de água na faixa de friabilidade, estimados pelo modelo $\sigma_p = 10^{a+bU}$, para os sistemas de colheita mecanizada com um e três ciclos (CM1 e CM3, respectivamente) de cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.), na linha de plantio e no canteiro, nas camadas de 0,00–0,10, 0,10–0,20, 0,20–0,30 e 0,30–0,40 m.

Camada (m)	Ds (LC) ⁽¹⁾ (Mg m ⁻³)	Ds (LP) ⁽¹⁾ (Mg m ⁻³)	σ_p (LC) ⁽²⁾ (kPa)	σ_p (LP) ⁽²⁾ (kPa)
CM3, na linha de plantio e faixa de friabilidade de 0,15 a 0,34				
0,00–0,10	1,36±0,45	1,08±0,17	392±15,63	243±7,92
0,10–0,20	1,29±0,29	1,10±0,07	358±6,83	224±4,83
0,20–0,30	1,26±0,29	1,24±0,83	385±14,01	243±3,46
0,30–0,40	1,34±0,18	1,07±0,04	387±17,23	265±24,83
CM3, no canteiro e faixa de friabilidade de 0,14 a 0,32				
0,00–0,10	1,36±0,05	1,12±0,14	441±6,57	346±3,46
0,10–0,20	1,27±0,03	1,10±0,09	402±8,31	261±10,37
0,20–0,30	1,21±0,45	1,06±0,32	413±5,91	286±5,91
0,30–0,40	1,30±0,16	1,14±0,03	409±8,95	310±7,92
CM1, na linha de plantio e faixa de friabilidade de 0,11 a 0,22				
0,00–0,10	1,42±0,07	1,31±0,03	369±18,29	236±2,48
0,10–0,20	1,52±0,30	1,39±0,07	435±9,73	337±14,01
0,20–0,30	1,42±0,32	1,36±0,23	399±9,07	300±4,13
0,30–0,40	1,31±0,26	1,30±0,02	434±18,30	335±3,46
CM1, no canteiro e faixa de friabilidade de 0,11 a 0,21				
0,00–0,10	1,54±0,21	1,39±0,09	356±3,46	275±11,53
0,10–0,20	1,50±0,28	1,41±0,15	360±9,07	303±4,13
0,20–0,30	1,46±0,12	1,40±0,07	409±4,97	310±4,13
0,30–0,40	1,44±0,04	1,31±0,01	413±25,92	321±3,46

⁽¹⁾Ds (LC) e Ds (LP), densidade do solo nos limites de contração e plasticidade, respectivamente. ⁽²⁾ σ_p (LC) e σ_p (LP), pressão de preconsolidação nos limites de contração e plasticidade, respectivamente.

campo, com predomínio do tráfego das máquinas sobre os resíduos vegetais depositados sobre o solo.

Os valores da área de contato (AC) foram decrescentes no sentido solo recoberto com palhada > solo sem palhada > superfície rígida (Tabela 5 e Figuras 3 e 4). A diminuição da AC e o aumento da PC na superfície rígida, em relação à superfície do solo com e sem palhada, foi resultante da capacidade do solo em melhor acomodar as garras dos rodados, com deformação do solo e aprofundamento dessas garras no perfil. Os resultados obtidos estão de acordo com os de Silva et al. (2003), que avaliaram a condição de consistência do solo na faixa de friabilidade. Estes autores observaram penetração total ou parcial das garras e que, dependendo da transferência de peso, parte dos flancos tocam o solo, o que serve como área de apoio.

Na superfície rígida, tanto o pneu quanto a superfície não se deformaram; porém, no solo recoberto com ou sem palhada, houve deformação do pneu e do solo (Tabela 5 e Figura 3). Em superfície com solo mobilizado, o solo sofre a deformação antes do pneu, e as condições de baixas pressões de inflação ou elevada carga podem sobrecarregar os pneus, o que provoca grandes deformações e proporciona áreas de contato maiores, próximas a uma elipse, com a parte central

tendendo para o formato de um retângulo (Vandenberg & Gill, 1962). A palhada da cana-de-açúcar contribui ainda mais para a deformação do pneu, por proporcionar maior acomodação das garras e dos flancos, com consequente aumento da área de contato pneu-solo.

O aumento da área de contato rodado/solo ocasionado pela existência de palhada (Tabela 5 e Figuras 3 e 4) mostrou-se eficiente na redução das pressões de contato aplicadas sobre o solo, uma vez que a palhada contribui para o aumento da área de contato rodado/solo, o que diminui o risco de compactação do solo pelo tráfego de máquinas. Esses resultados corroboram os de Keller & Arvidsson (2004), que relataram que o aumento da área de contato dos rodados com o solo mostrou-se eficiente para reduzir as pressões e a compactação do solo pelo tráfego de máquinas. Soane et al. (1990), ao avaliar o tráfego de máquinas, com e sem cobertura de palha na superfície do solo, concluíram que, sem a presença de palha, a área de contato foi reduzida significativamente. Isso porque a presença de palha reduziu a energia aplicada ao solo, ao aumentar a AC pneu-solo.

Ao se associar os modelos de compressibilidade do solo às pressões de contato das máquinas (Tabela 5), pode-se afirmar que as operações mecanizadas, quando realizadas dentro da faixa de friabilidade (Figuras 1 e 2 e Tabela 4), provavelmente não resultarão em compactação adicional dos solos, pois as pressões de contato das máquinas estão abaixo das suas capacidades de suporte de carga. Resultados semelhantes foram obtidos por Severiano et al. (2010), que inferiram que a colheita mecanizada da cana-de-açúcar na zona de friabilidade, em Latossolo Vermelho-Amarelo e Cambissolo, não provocou compactação prejudicial à cultura.

No caso de solo sem cobertura vegetal, o que geralmente ocorre em plantios em novas áreas, com preparo periódico do solo, a pressão imposta sobre o solo ($PCR < 199,89 \text{ kPa}$) foi novamente inferior à CSC do solo com umidade na faixa friável ($\sigma_p < 224 \text{ kPa}$). Resultados similares foram encontrados por Souza et al. (2012), que observaram valores de pressão de preconconsolidação crítica superiores aos valores de pressão de preconconsolidação na camada superficial para colhedora, com qualquer umidade do solo, na região da soqueira, o que indica adequação da máquina à preservação da estrutura do solo.

Tabela 5. Pressão exercida pelo contato rodado-solo, para diferentes maquinários e superfícies, determinada por meio da área de contato real e da elipse.

Superfície	PCE (kPa)	PCR (kPa)
Pneu dianteiro do trator		
Superfície rígida	81,96	291,35
Solo sem palhada	76,16	162,73
Solo com palhada	57,72	105,84
Pneu traseiro do trator		
Superfície rígida	73,41	434,65
Solo sem palhada	66,62	124,07
Solo com palhada	53,05	98,26
Transbordo carregado ⁽¹⁾		
Superfície rígida	201,97	410,11
Solo sem palhada	145,32	199,89
Solo com palhada	127,99	169,09
Esteira de colhedora		
Superfície rígida	91,68	622,10
Solo sem palhada	48,04	99,84
Solo com palhada	39,38	76,61

⁽¹⁾Transbordo carregado com 14 Mg de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.). PCE, pressão de contato da elipse. PCR, pressão de contato real.

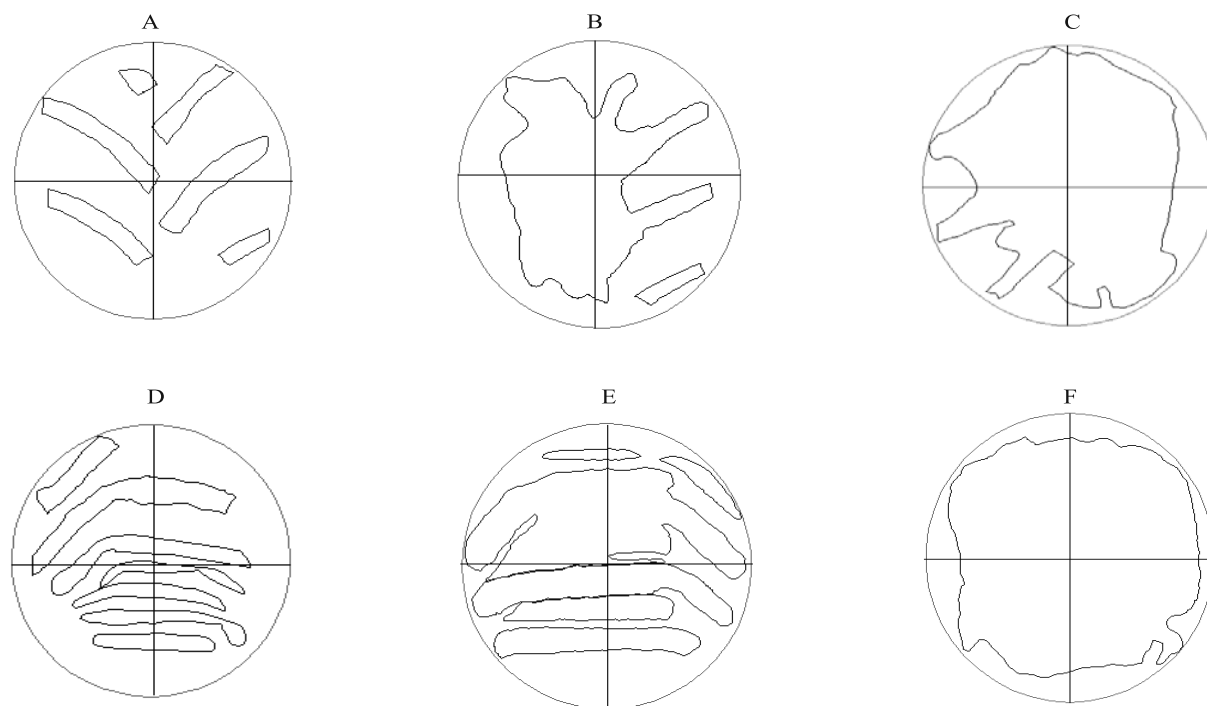


Figura 3. Áreas de contato dos rodados do trator (A, B e C) e do transbordo (D, E e F), obtidas em superfície rígida (A e D) e no solo sem (B e E) e com palha (C e F). Linha cinza: área da elipse. Linha preta: área real.

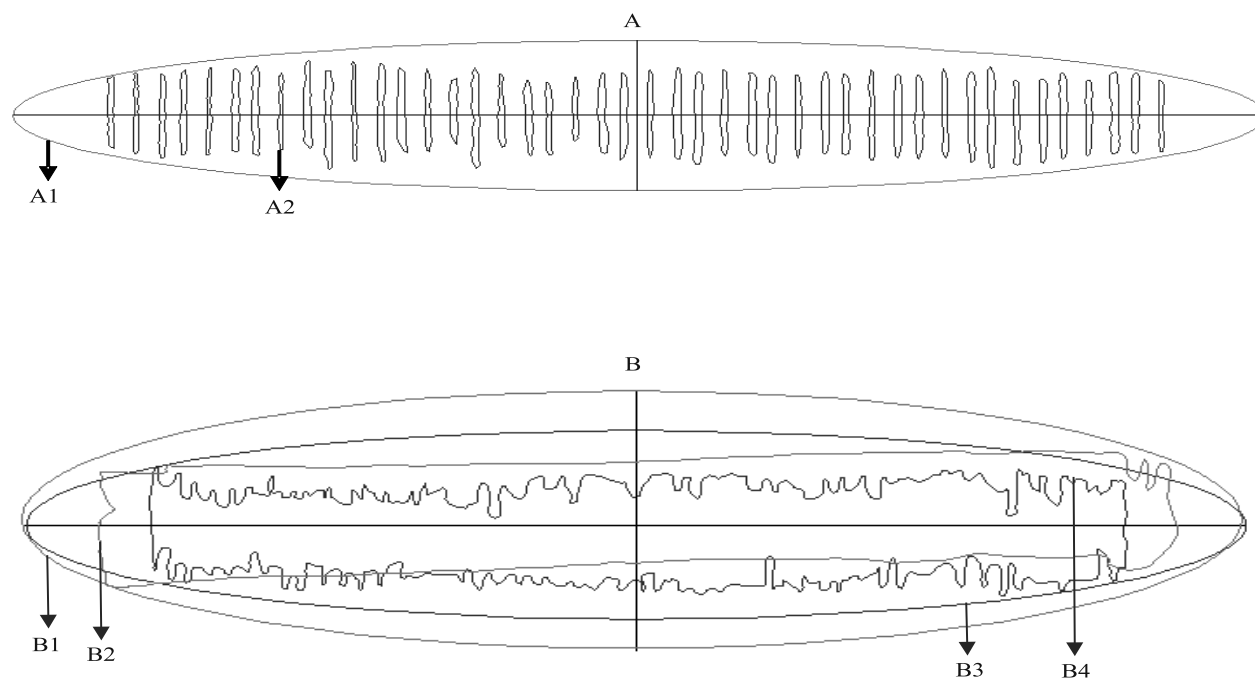


Figura 4. Áreas de contato da esteira da colhedora obtidas em superfície rígida (A) e no solo com (B1 e B2) e sem palha (B3 e B4). Área da elipse: A1, B1 e B3. Área real: A2, B2 e B4.

A partir dos modelos obtidos, pode-se definir, para o solo, o momento ideal para a entrada dos equipamentos e dos maquinários nos canaviais, para a realização das operações agrícolas. Para isso, é necessário saber o teor de água do solo, o que pode ser determinado por meio de tensiômetro, sensor ou pelo método gravimétrico.

Conclusões

1. O sistema de manejo com três ciclos de cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.) com colheita mecanizada apresenta maior pressão de preconsolidação do solo na linha de plantio, na camada superficial, e no canteiro, até 0,30 m de profundidade, em comparação ao sistema com um ciclo de colheita mecanizada, o que indica efeito dos ciclos de cultivo na compactação do solo.

2. A capacidade de suporte de carga dos solos, na faixa de friabilidade, é superior às pressões de contato aplicadas na superfície do solo pelos rodados dos maquinários agrícolas, o que indica preservação da estrutura do solo nas camadas em estudo.

3. A colhedora de cana-de-açúcar, com massa de 18,3 Mg, é a máquina que apresenta menor pressão de contato sobre o solo, com e sem palhada, o que mostra seu menor potencial de compactação, enquanto o transbordo carregado com 14 Mg de cana-de-açúcar apresenta maior potencial de compactação, em condição de umidade acima do limite de plasticidade.

4. Os restos culturais da cana-de-açúcar (palhada) depositados sobre o solo reduzem a pressão de contato rodado-solo, em razão do aumento da área de contato, o que favorece a preservação da estrutura do solo e minimiza o processo de compactação do solo.

Agradecimentos

À Usina São Martinho, pela cessão da área e o apoio na realização do experimento.

Referências

ARAUJO-JUNIOR, C.F.; DIAS JUNIOR, M. de S.; GUIMARAES, P.T.G.; ALCÂNTARA, E.N. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.115-131, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000100011.

BOTTA, G.F.; RIVERO, D.; TOURN, M.; MELCON, F.B.; POZZOLO, O.; NARDON, G.; BALBUENA, R.; BECERRA, A.T.; ROSATTO, H.; STADLER, S. Soil compaction produced by tractor with radial and cross-ply tyres in two tillage regimes. **Soil and Tillage Research**, v.101, p.44-51, 2008. DOI: 10.1016/j.still.2008.06.001.

CAMARGO, O.A. de; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1986. 94p.

CAVICHIOLO, F.A.; FURLANI, C.E.A.; TOLEDO, A. de; SILVA, R.P. da; RIBEIRO, C.S. Resistência mecânica do solo à penetração na fileira e entrefileira de cana-de-açúcar em função da mecanização. **Engenharia na Agricultura**, v.20, p.46-51, 2012.

DIAS JUNIOR, M. de S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F. de; ALVAREZ V., H.V.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.55-95.

DIAS JUNIOR, M. de S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114p. Dissertation (Ph.D.) – Michigan State University, East Lansing.

DONAGEMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B. de; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p. (Embrapa Solos. Documentos, 132).

HALLONBORG, U. Super ellipse as tyre-ground contact area. **Journal of Terramechanics**, v.33, p.125-132, 1996. DOI: 10.1016/S0022-4898(96)00013-4.

IORI, P.; SILVA, R.B. da; DIAS JUNIOR, M. de S.; LIMA, J.M. de. Pressão de preconsolidação como ferramenta de análise da sustentabilidade estrutural de classes de solos com diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.1448-1456, 2012. DOI: 10.1590/S0100-06832012000500008.

KELLER, T.; ARVIDSSON, J. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. **Soil and Tillage Research**, v.79, p.191-205, 2004. DOI: 10.1016/j.still.2004.07.008.

KONDO, M.K.; DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.211-218, 1999. DOI: 10.1590/S0100-06831999000200004.

PACHECO, E.P.; CANTALICE, J.R.B. Compressibilidade, resistência a penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.403-415, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000200010.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; CASTRO, M.B.; OLIVEIRA, L.F.C.; COSTA, K.A. de P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: II – quantificação das restrições às funções edáficas do solo em decorrência da compactação prejudicial. **Engenharia Agrícola**, v.30, p.414-423, 2010. DOI: 10.1590/S0100-69162010000300006.

- SILVA, A.J.N. da; CABEDA, M.S.V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistema de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.921-930, 2006. DOI: 10.1590/S0100-06832006000600001.
- SILVA, A.R.; DIAS JUNIOR, M. de S.; GUIMARÃES, P.T.G.; ARAÚJO JÚNIOR, C.F. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.207-216, 2006. DOI: 10.1590/S0100-06832006000200002.
- SILVA, R.B. da; IORI, P.; LANÇAS, K.P.; DIAS JUNIOR, M.S. Modelagem e determinação do estado crítico de consolidação a partir da relação massa e volume em solos canavieiros. **Revista de Ciências Agrárias**, v.33, p.376-389, 2010.
- SILVA, R.B. da; LANÇAS, K.P.; DIAS JUNIOR, M.S. O limite da terra. **Cultivar: Máquinas**, ano 3, p.12-19, 2003.
- SILVA, R.B. da; LANÇAS, K.P.; MASQUETTO, B.J. Consolidômetro: equipamento pneumático-eletrônico para avaliação do estado de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.607-615, 2007. DOI: 10.1590/S0100-06832007000400001.
- SNEDECOR, G.W.; COCHRAN, W.G. **Statistical methods**. 8th ed. Ames: Iowa State University, 1989. 503p.
- SOANE, B.D. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**, v.16, p.179-201, 1990. DOI: 10.1016/0167-1987(90)90029-D.
- SOUZA, G.S. de; SOUZA, Z.M. de; SILVA, R.B. da; ARAÚJO, F.S.; BARBOSA, R.S. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, p.603-612, 2012. DOI: 10.1590/S0100-204X2012000400017.
- SOUZA, G.S. de; SOUZA, Z.M. de; SILVA, R.B. da; BARBOSA, R.S.; ARAÚJO, F.S. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.135-146, 2014. DOI: 10.1590/S0100-06832014000100013.
- UPADHYAYA, S.K.; CHANCELLOR, W.J.; PERUMPRAL, J.V.; SCHAFER, R.L.; GILL, W.R.; VANDENBERG, G.E. **Advances in soil dynamics**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1994. 313p.
- VAN RAIJ, B.; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. 285p.
- VANDENBERG, G.E.; GILL, W.R. Pressure distribution between a smooth tire and the soil. **Transactions of the ASAE**, v.5, p.105-107, 1962. DOI: 10.13031/2013.40947.

Recebido em 01 de outubro de 2014 e aprovado em 23 de março de 2015