

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

JOÃO VICTOR TARTAGLIA MOREIRA

**EFICIÊNCIA TRATÓRIA DE UM TRATOR AGRÍCOLA DE PNEUS EM FUNÇÃO
DA SUPERFÍCIE DE TRÁFEGO**

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2020**

JOÃO VICTOR TARTAGLIA MOREIRA

**EFICIÊNCIA TRATÓRIA DE UM TRATOR AGRÍCOLA DE PNEUS EM FUNÇÃO
DA SUPERFÍCIE DE TRÁFEGO**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências, para obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

Orientador: Marconi Ribeiro Furtado Júnior

Coorientador: Gefferson Pereira da Paixão

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2020**

JOÃO VICTOR TARTAGLIA MOREIRA

**EFICIÊNCIA TRATÓRIA DE UM TRATOR AGRÍCOLA DE PNEUS EM FUNÇÃO
DA SUPERFÍCIE DE TRÁFEGO**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências, para obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

APROVADO: 02 de dezembro de 2020.

Assentimento:



João Victor Tartaglia Moreira
Autor



Marconi Ribeiro Furtado Júnior
Orientador

Àqueles que nunca mediram esforços para que eu fosse atrás dos meus sonhos, minha família,

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Adalgisa e Márcio, pelo apoio incondicional e por tudo que fizeram para que eu chegasse até aqui.

À minha irmã, Maria Alice, que caminhou ao meu lado na reta final da minha graduação, por toda convivência e paciência.

Aos meus avós que sempre olharam por mim, neste plano e em outros, por toda proteção e luz que guiaram minha jornada.

À Anna, por todo companheirismo e apoio ao longo desses anos.

Aos meus professores, por todos ensinamentos valiosos que contribuíram para minha formação profissional e pessoal.

Ao professor Marconi Ribeiro Furtado Júnior pela orientação, por todas oportunidades e conselhos que foram de grande importância durante minha graduação.

Ao coorientador Gefferson Pereira da Paixão que foi imprescindível para o desenvolvimento desse trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela oportunidade de realizar o curso.

RESUMO

O trator agrícola é a principal fonte de potência utilizada para tracionar e acionar implementos e máquinas agrícolas. Seria ideal que toda potência produzida pelo motor fosse utilizada para exercer tração. No entanto, existem perdas associadas à conversão de energia, transmissão e interação dos dispositivos de tração com o solo. Uma vez que os custos associados às operações mecanizadas representam uma grande parcela dos custos de produção agrícola, é importante avaliar o desempenho energético de tratores e máquinas agrícolas. Objetivou-se com esse trabalho avaliar a influência da carga e da superfície de tráfego sobre o desempenho operacional de um trator agrícola de pneus. O ensaio de tração foi conduzido no município de Viçosa (MG). Foi utilizado um trator-lastro que foi tracionado por meio de um cabo de aço pelo trator avaliado. Foi avaliado um trator John Deere[®], modelo 5705 4x2 com tração dianteira auxiliar (TDA) e potência nominal de 63 kW (85 cv) no motor a 2250 rpm. Foram avaliadas três superfícies de tráfego (solos manejados sob sistema de plantio direto, cultivo mínimo e preparo convencional) e quatro esforços de tração (9,47; 11,41; 15,05 e 22,33 kN), obtidos pela variação das marchas do trator-lastro. Os dados coletados em campo via sensores eletrônicos instalados no trator avaliado e, posteriormente, foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Houve interação dos fatores carga e superfície ao nível de 1% de significância para todas as variáveis analisadas. O solo manejado sob plantio convencional apresentou os maiores valores de patinação, seguido do cultivo mínimo e plantio direto. O maior consumo específico de combustível ocorreu no plantio convencional ($1,67 \text{ L}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) e o menor no plantio direto ($0,50 \text{ L}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$). A maior eficiência tratória foi obtida na superfície de cultivo mínimo (0,80) e a menor no plantio convencional (0,27). As superfícies mais consolidadas (plantio direto e cultivo mínimo) apresentaram desempenho operacional superior para os parâmetros avaliados, em relação à superfície de solo mobilizado (plantio convencional).

Palavras-chave: eficiência energética; mecanização agrícola; relação máquina-solo.

ABSTRACT

Tractors are the main power source used for pulling implements and agricultural machines. An ideal scenario would be converting all the power generated by the engine into useful traction, however, there are power losses due energy conversion, transmission and interaction between tractive device and soil surface. Since field machine operations contribute a major portion of the total cost of crop production, it is important to evaluate energetic performance of agricultural tractors and machines. This study aimed to investigate the influence of load and soil surface on the operational performance of a wheeled agricultural tractor. The field traction tests occurred at Viçosa (MG). A braking tractor was connected to a pulling tractor by a steel cable. The studied tractor was a 63 kW (85 cv) mechanical front-wheel drive (MFWD) John Deere[®] (5705), at engine speed of 2250 rpm. Three cropping systems were used to impose experimental traffic conditions (no-till, minimum tillage and tilled soil) and four different loads (9,47; 11,41; 15,05 and 22,33 kN), obtained by shifting gears on the braking tractor. Tractor data was collected using electronic sensors, and then an analysis of variance (ANOVA) was performed over the data. There was interaction among the factors load and traffic surface at 1% significance level and the observations. Higher travel reduction ratios were found on tilled soil, followed by minimum tillage and no-till soils. The biggest value for specific fuel consumption was found on tilled soil ($1,67 \text{ L}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) and the smallest on no-till ($0,50 \text{ L}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$). The highest tractive efficiency occurred at minimum tillage surface (0,80) and the lowest at tilled soil (0,27). Best traction performance was found on more structured soil surfaces (no-till and minimum tillage) for the evaluated parameters, when compared to mobilized soil (tilled surface).

Keywords: agricultural mechanization; energetic efficiency; terramechanics.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. MATERIAL E MÉTODOS	12
2.1. Caracterização física das superfícies trafegadas.....	14
2.1.1. Teor de água no solo.....	14
2.1.2. Densidade do solo.....	15
2.1.3. Resistência do solo à penetração	15
2.2. Instrumentação do trator	16
2.2.1. Velocidade operacional do trator	16
2.2.2. Rotação dos pneus	16
2.2.3. Força de tração	17
2.2.4. Consumo horário de combustível.....	18
2.3. Avaliação dos parâmetros operacionais.....	18
2.3.1. Razão de redução de percurso (patinagem).....	18
2.3.2. Eficiência tratória.....	19
2.3.3. Resistência ao rolamento.....	19
2.3.4. Tração bruta dos pneus.....	20
2.3.5. Tração líquida dos pneus	20
2.3.6. Estimativa da carga dinâmica atuando nos eixos do trator.....	21
2.3.7. Potência na barra de tração.....	22
2.3.8. Consumo específico de combustível	22
2.4. Análise estatística	23
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
3.1. Caracterização das superfícies de tráfego	24
3.2. Análise dos parâmetros operacionais.....	25
3.2.1. Força de tração	26
3.2.2. Razão de redução de percurso (patinagem)	27

3.2.3.	Potência na barra de tração.....	28
3.2.4.	Consumo horário de combustível.....	29
3.2.5.	Consumo específico de combustível	30
3.2.6.	Eficiência tratória.....	32
4.	CONCLUSÕES.....	35
5.	REFERÊNCIAS.....	36

1. INTRODUÇÃO

O trator agrícola é a principal fonte de potência para realização de operações pertinentes à produção agrícola e pecuária. É uma máquina versátil que conta com diversos mecanismos que possibilitam atuar em conjunto com uma ampla gama de implementos e máquinas agrícolas (FURTADO JÚNIOR, 2016; JANULEVIČIUS; DAMANAUSKAS, 2015).

Uma das mais importantes funções de um trator agrícola é tracionar implementos acoplados na barra de tração (FURTADO JÚNIOR, 2016; GUPTA *et al.*, 2019). Seria ideal que toda potência do motor fosse utilizada para exercer tração, o que não acontece na prática, devido às perdas. A maior parte da energia potencial é perdida durante a conversão de energia química em energia mecânica. No entanto, também existem as perdas associadas ao sistema de transmissão e aos dispositivos de tração (SIMIKIĆ *et al.*, 2014).

Devido à complexidade da interação entre os dispositivos de tração (pneus ou esteiras) e a superfície do solo, estima-se que entre 20 e 55% da potência disponível é dissipada nesse processo (JANULEVIČIUS; DAMANAUSKAS, 2015; ŠMERDA; ČUPERA, 2010; TAGHAVIFAR; MARDANI, 2014). Essa energia, além de não ser aproveitada para exercer força de tração, também acelera o desgaste dos pneus (KELLER; ARVIDSON, 2016). As perdas de potência também têm influência direta no consumo de combustível do trator (VAN LINDEN; HERMAN, 2014).

A eficiência em produzir tração depende de parâmetros relacionados ao trator (características dos dispositivos de tração, carga vertical aplicada ao eixo motriz, pressão interna dos pneus) e fatores relacionados ao solo (resistência à penetração, teor de água) (FURTADO JÚNIOR, 2016; SHAFAEI; LOGHAVI; KAMGAR, 2018; SOYLU; ÇARMAN, 2020). Na prática, é mais fácil regular os parâmetros relacionados ao maquinário, pois, dificilmente têm-se controle sobre as características da superfície de tráfego (KELLER; ARVIDSON, 2016).

As características dos pneus influenciam diretamente na área de contato que estes apresentam com o solo, o que interfere na capacidade de tração e no potencial de compactação do solo. Quanto maior a área de contato, maior será a capacidade do solo em resistir aos esforços cisalhantes proporcionados pelos pneus de tração, o que representa maior capacidade do solo em suportar a máquina e produzir esforço de tração. Além disso, a maior área de contato na interface pneu-solo também é fundamental para reduzir o potencial de compactação do solo, pois nessas condições a pressão exercida na superfície é pontualmente menor

(JANULEVIČIUS; DAMANAUSKAS, 2015; KELLER; ARVIDSON, 2016; SIMIKIĆ *et al.*, 2014;).

A área de contato entre a superfície de tráfego e os pneus é influenciada pela deflexão dos pneus, que por sua vez é regida pela carga vertical aplicada ao eixo motriz e a pressão interna dos pneus. Deve-se buscar a configuração ótima desses parâmetros a fim de aumentar a área de contato, visando aumentar a tração líquida e reduzir o potencial de compactação. A carga vertical aplicada ao eixo motriz, conhecida como lastro, pode ser aumentada por meio da adição de lastro sólido (placas de ferro fundido) no trator ou pela adição de água dentro dos pneus, conhecido como lastro líquido (KUMAR *et al.*, 2018). Em relação à pressão de insuflação dos pneus, Ekinçi, Çarman e Kahramanli (2015), Janulevičius e Damanauskas (2015) e Spagnolo *et al.* (2013) concluíram que ao operar com menores pressões de insuflação é possível aumentar a interface pneu-solo. No entanto, baixas pressões de insuflação podem proporcionar maior resistência ao rolamento (JANULEVIČIUS; DAMANAUSKAS, 2015; TAGHAVIFAR; MARDANI, 2014, 2015).

Em conjunto, esses fatores combinados com a força de tração realizada por um trator, definem o percentual de patinagem dos dispositivos de tração (FURTADO JÚNIOR, 2016). Conforme a ASAE S296.5 (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, 2003), a patinagem é definida como a diferença percentual entre a velocidade de deslocamento de um trator e a velocidade tangencial periférica do dispositivo de tração.

Existe uma faixa ótima de patinagem onde o trator opera na máxima eficiência tratória (SOYLU; ÇARMAN, 2020). Com base em estudos prévios, é proposto que a patinagem dos rodados seja mantida entre 8 e 12% a fim de otimizar a performance de um trator, reduzir o consumo de combustível e minimizar a compactação do solo. Ressalta-se que patinagens menores que 7% são indesejáveis devido ao aumento da resistência ao rolamento. Entretanto, também há ineficiência para valores superiores a 15%. Ao operar na faixa ótima, estima-se que entre 60 e 70% da potência disponibilizada pelo motor é utilizada para realizar tração (DAMANAUSKAS; JANULEVIČIUS; PUPINIS, 2015; EKINCI; ÇARMAN, 2017; GUPTA *et al.*, 2019; MOITZI *et al.*, 2013)

A eficiência tratória é um importante parâmetro para avaliar a performance de um trator agrícola. A eficiência tratória é definida como o percentual da tração bruta potencial que é convertida em tração líquida pelo pneu, corrigida de acordo com a patinagem (SHAFAEI; LOGHAVI; KAMGAR, 2018).

Taghavifar e Mardani (2014) ressaltam a importância de estudos a fim de reduzir as perdas de potência e otimizar a eficiência energética de veículos fora de estrada, pois, devido

ao elevado porte, esses veículos demandam grandes fontes de potência. Uma vez que os custos associados às operações mecanizadas representam uma grande parcela dos custos de produção agrícola, à medida que os dispêndios relacionados à energia aumentam, o cenário torna-se mais crítico (RANJBARIAN; ASKARI; JANNATKHAH, 2017). Há, também, um esforço mundial focado em tornar as práticas agrícolas mais sustentáveis. Logo, a otimização da interação máquina solo é essencial, visto que pode resultar numa redução significativa do consumo de combustíveis fósseis e compactação do solo. (DISERENS; BATTIATO; SARTORI, 2014; BATTIATO; ALAOUI; DISERENS, 2015; BATTIATO; DISERENS, 2017, 2019)

Nesse contexto, em razão das distintas superfícies trafegadas pelos tratores agrícolas, é essencial o levantamento de informações que forneçam parâmetros para ajustar a máquina a essas condições. Assim, torna-se possível atingir o máximo de eficiência tratória e reduzir o consumo de combustível (KUMAR *et al.*, 2018; KOCHER *et al.*, 2017). Portanto, objetivou-se avaliar a eficiência tratória de um trator agrícola de pneus em três condições de superfície de tráfego: cultivo mínimo, plantio direto e preparo convencional; a partir de dados coletados em campo via sensores eletrônicos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos no campo experimental Diogo Alves de Melo, pertencente ao Departamento de Fitotecnia, da Universidade Federal de Viçosa (UFV), localizada no município de Viçosa, Minas Gerais. Foi avaliado o desempenho de um trator da marca John Deere® (Figura 1), modelo 5705 4x2 com tração dianteira auxiliar (TDA) e potência nominal de 63 kW (85 cv) no motor a 2250 rpm. Foram utilizados pneus diagonais cujas características encontram-se sumarizadas na Tabela 1, junto com outras especificações do trator. O trator recebeu instrumentação eletrônica para levantamento dos dados em campo, conforme o Item 3.2.

Figura 1 – Trator John Deere® modelo 5705



Fonte: Furtado Júnior, 2013.

Tabela 1 – Especificações do trator John Deere modelo 5705

Especificações	
Potência do motor na rotação nominal	63 kW
Rotação de potência máxima	2.400 rpm
Torque máximo	330 Nm
Número de cilindros do motor	4
Cilindrada	4.500 cm ³
Aspiração	Turboalimentado
Pneus dianteiros - Goodyear® Dyna Torque II – R1	12.4 – 24
Pneus traseiros - Pirelli® TM 95 – R1	18.4 – 30
Pressão interna dos pneus	13 psi

Fonte: Furtado Júnior, 2013 (adaptado).

Os tratamentos constituíram-se da combinação entre três superfícies de tráfego (plantio direto, plantio convencional e cultivo mínimo) e quatro forças de tração, no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. Em cada tratamento o trator desenvolveu quatro forças de tração com o intuito de se alcançar quatro níveis de patinação para correção dos modelos empíricos de eficiência tratória. As forças de tração foram obtidas pela variação das marchas de um trator-lastro que foi tracionado pelo trator estudado por meio de um cabo de aço (Figura 2). As forças médias teóricas foram determinadas em pista de concreto, sendo elas: 9,47; 11,41; 15,05 e 22,33 kN. Para cada força avaliada foram realizadas quatro repetições.

Figura 2 – Ensaio de tração sendo conduzido em uma das áreas experimentais



Fonte: Furtado Júnior, 2013.

Foram utilizadas parcelas de 2 metros de largura por 30 metros de comprimento, totalizando uma área de 60 m². As superfícies de tráfego foram obtidas por meio de sistemas de manejo do solo, conforme descrito na Tabela 2. A Figura 3 apresenta as áreas experimentais avaliadas.

Tabela 2 – Sistemas de manejo que correspondem à superfície trafegada em cada tratamento

Superfície	Manejo	Forma de preparo
1	Plantio direto	Dessecação da cobertura vegetal, sem revolvimento de solo
2	Plantio convencional	Uma aração e duas gradagens
3	Cultivo mínimo	Utilização apenas do escarificador

Fonte: O autor.

Figura 3 – Áreas experimentais manejadas em sistema de plantio direto (a), preparo convencional (b) e cultivo mínimo (c)



(a)



(b)



(c)

Fonte: O autor.

2.1. Caracterização física das superfícies trafegadas

Os parâmetros relativos às propriedades físicas do solo foram avaliados de acordo com a metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017), publicada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Conforme ressaltado por Lyasko (2010), é importante considerar as características do solo ao se avaliar a eficiência de um veículo fora de estrada em produzir tração.

2.1.1. Teor de água no solo

Para determinar o teor de água no solo, utilizou-se o método gravimétrico padrão, onde o solo foi seco em estufa à temperatura de 105 – 110° C até atingir massa constante. Foram

realizadas amostragens do solo para a determinação do teor de água na camada de 0 a 0,2 m de profundidade (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

2.1.2. Densidade do solo

A densidade do solo foi determinada na camada de 0 a 0,2 m de profundidade, utilizando-se o método do anel volumétrico para o plantio direto e cultivo mínimo. As amostras foram coletadas e acondicionadas em cápsulas de alumínio, lacradas com fita adesiva até a chegada ao laboratório. Para o plantio convencional, utilizou-se o método do torrão parafinado. As amostras coletadas foram acondicionadas em sacos plástico após a coleta com o trado (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

2.1.3. Resistência do solo à penetração

Determinou-se a resistência do solo à penetração com o uso de um penetrômetro modelo penetroLOG, marca FALKER® (Figura 4). Na camada de 0 a 0,2 m de profundidade e expressos em MPa (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, 2018, 2019).

Figura 4 – Penetrômetro Falker penetroLOG utilizado no experimento



Fonte: Furtado Júnior, 2016.

2.2. Instrumentação do trator

O trator recebeu um conjunto de transdutores para a coleta de dados em campo. Todos os transdutores foram conectados a um sistema de aquisição de dados, que por sua vez foi conectado a um computador que armazenou os dados para posterior processamento. Foi utilizado um sistema de aquisição de dados modelo Spider 8[®] da marca HBM[®], gerenciado pelo software HBM Catman[®] 2.2, instalado no computador portátil embarcado no trator.

2.2.1. Velocidade operacional do trator

A velocidade do trator durante a operação, que corresponde à velocidade de translação dos pneus, foi obtida por meio de uma unidade de radar de efeito Doppler, da marca Dickey John[®], modelo Radar II (Figura 5).

Figura 5 – Unidade de radar para medição da velocidade instantânea



Fonte: Furtado Júnior, 2013.

2.2.2. Rotação dos pneus

A velocidade de rotação dos pneus foi determinada com o uso de sensores indutivos (transdutores) instalados em cada uma das rodas por meio de suportes. Foram utilizados transdutores PRCM18-8DP da marca Autonics[®] (Figura 6), de saída PNP normalmente fechado e frequência de resposta de 350Hz. O alvo de detecção, responsável pela indução do sensor (alteração no campo magnético), foi uma coroa circular fixada na calota.

Figura 6 – Sensor indutivo PRCM18-8DP instalado no suporte



Fonte: Furtado Júnior, 2013.

2.2.3. Força de tração

Utilizou-se uma célula de carga da marca Alfa Instrumentos® para mensurar a força de tração desenvolvida pelo trator. O modelo utilizado foi uma célula da linha Z com capacidade nominal de 50 kN e sensibilidade de $2 \pm 0,1\% \text{ mV} \cdot \text{V}^{-1}$. A célula de carga foi instalada na barra de tração por meio de um suporte (Figura 7).

Figura 7 – Célula de carga e suporte para instalação no trator



Fonte: Furtado Júnior, 2016.

2.2.4. Consumo horário de combustível

O consumo horário de combustível foi determinado utilizando-se um medidor de fluxo volumétrico da marca OVAL M-III®, linha FLOWMATE, modelo LSF41C (Figura 8).

Figura 8 – Fluxômetro utilizado para determinação do consumo de combustível



Fonte: Furtado Júnior, 2013.

2.3. Avaliação dos parâmetros operacionais

A metodologia utilizada para estimar os parâmetros operacionais do trator a partir dos dados coletados via sensores, seguiu o proposto pelas referências normativas ASAE S296.5 e ASAE D497.7 (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, 2003, 2011).

2.3.1. Razão de redução de percurso (patinagem)

A patinagem dos pneus foi obtida por meio da relação entre velocidade translacional e rotacional para cada um dos rodados da máquina, de acordo com a Equação 1.

$$s = \frac{V_r - V_t}{V_r} = 1 - \frac{V_t}{V_r} \quad (1)$$

Em que: s – patinagem dos pneus (decimal);
 V_r – velocidade rotacional ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);
 V_t – velocidade translacional ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

2.3.2. Eficiência tratória

A estimativa da eficiência tratória do trator foi realizada por meio de um conjunto de equações empíricas, considerando-se a distribuição dinâmica das cargas verticais atuando nos eixos motrizes. O valor de eficiência tratória para cada parcela foi calculado considerando-se a Equação 2.

$$TE = (1 - s) \frac{NT}{GT} \quad (2)$$

Em que: TE – eficiência tratória (decimal);
s – patinagem dos pneus (decimal);
NT – tração líquida dos pneus (kN);
GT – tração bruta dos pneus (kN).

2.3.3. Resistência ao rolamento

A resistência ao rolamento é definida como a diferença entre a tração bruta e a tração líquida dos pneus. Está associada à energia perdida devido à deformação do solo e dos pneus e outras resistências internas ao movimento. Pode ser entendida como o somatório das perdas que não estão associadas à patinagem (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, 2003; BOTTA *et al.*, 2012). A resistência ao rolamento foi calculada conforme a Equação 3.

$$MR = W \cdot \left(\frac{1}{B_n} + 0,04 + \frac{0,05 \cdot s}{\sqrt{B_n}} \right) \quad (3)$$

Em que: MR – resistência ao rolamento (kN);
W – carga dinâmica vertical atuando no dispositivo de tração (kN);
B_n – índice de mobilidade do dispositivo de tração (adimensional);
s – patinagem dos pneus (decimal).

O índice de mobilidade (B_n) é um adimensional que depende de parâmetros relacionados aos pneus e à superfície trafegada. É um modelo de contato pneu-solo simplificado que pode ser calculado de maneira empírica ou semi-empírica (HEGAZY; SANDU, 2013; KIM, W. S.;

KIM, Y. S.; KIM, Y. J., 2020). O índice de mobilidade foi obtido conforme a metodologia proposta pela ASAE D497.7 (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, 2011), apresentada na Equação 4.

$$B_n = \left(\frac{CI \cdot b \cdot d}{W} \right) \cdot \left(\frac{1 + 5 \frac{\delta}{h}}{1 + 3 \frac{b}{d}} \right) \quad (4)$$

Em que: CI – índice de cone para a camada de 0 a 15 cm de profundidade (kPa);
 W – carga dinâmica vertical atuando no pneu (kN);
 b – largura da seção do pneu sem aplicação de carga vertical (m);
 d – diâmetro do pneu sem aplicação de carga vertical (m);
 h – altura da seção do pneu (m);
 δ – deflexão do pneu (m);

2.3.4. Tração bruta dos pneus

A tração bruta dos pneus é definida como a soma entre tração líquida e a resistência ao rolamento (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, 2003). Pode ser entendida como o potencial de tração que o dispositivo apresentaria se não existissem as perdas associadas a resistência do rolamento. A tração bruta dos pneus foi calculada conforme a Equação 5.

$$GT = W \cdot (0,88 \cdot (1 - e^{-0,1 \cdot B_n}) \cdot (1 - e^{-7,5 \cdot s}) + 0,04) \quad (5)$$

Em que: GT – tração bruta (kN);
 W – carga dinâmica vertical atuando no pneu (kN);
 B_n – índice de mobilidade do dispositivo de tração (adimensional);
 s – patinação dos pneus (decimal).

2.3.5. Tração líquida dos pneus

A tração líquida produzida pelos pneus é a diferença entre a tração bruta disponibilizada no eixo motriz e a resistência ao rolamento (TAGHAVIFAR; MARDANI, 2015). Pode ser

entendida como a força paralela à direção do movimento desenvolvida pelos dispositivos de tração e transferida para o trator (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, 2003). A tração líquida foi calculada de acordo com a Equação 6.

$$NT = W \cdot \left(0,88 \cdot (1 - e^{-0,1 \cdot B_n}) \cdot (1 - e^{-7,5 \cdot s}) - \frac{1}{B_n} - \frac{0,05 \cdot s}{\sqrt{B_n}} \right) \quad (6)$$

Em que: NT – tração líquida dos pneus (kN);
 W – carga dinâmica vertical atuando no pneu (kN);
 B_n – índice de mobilidade do dispositivo de tração (adimensional);
 s – patinagem dos pneus (decimal).

2.3.6. Estimativa da carga dinâmica atuando nos eixos do trator

A transferência de peso é um fenômeno que ocorre no momento em que a força de tração é gerada. Esse fenômeno é caracterizado pela alteração da distribuição de carga sobre os eixos dianteiro e traseiro do trator. A transferência de peso faz com que a carga aplicada ao eixo traseiro aumente com o aumento da força de tração, ao mesmo tempo que há uma redução em relação ao eixo dianteiro (BATTIATO; DISERENS, 2017). Essa alteração foi considerada pois exerce influência na capacidade de tração dos pneus. Realizou-se a estimativa da carga dinâmica atuando nos eixos considerando-se as Equações 7 e 8.

$$W_f = \frac{W_t \cos \beta C_1 - W_t \sin \beta C_2 - F \cos \alpha C_3 - F \sin \alpha C_3 - MR_f r_f - MR_r r_r}{C_4 - n_{ta}} \quad (7)$$

$$W_r = \left(\frac{W_t \cos \beta + F \sin \alpha}{n_{ta}} \right) - W_f \quad (8)$$

Em que: W_f – carga vertical atuando nos pneus dianteiros (kN);
 W_r – carga vertical atuando nos pneus traseiros (kN);
 W_t – massa total do trator (kN);
 α – ângulo de aplicação da força na barra do trator em relação à superfície (radianos);
 β – inclinação da superfície trafegada (radianos);

- MR_f – resistência ao rolamento dos pneus dianteiros (kN);
 MR_r – resistência ao rolamento dos pneus traseiros (kN);
 r_f – raio de rolamento dos pneus dianteiros (m);
 r_r – raio de rolamento dos pneus traseiros (m);
 C_1, C_2, C_3 e C_4 – constantes relativas às dimensões do trator (adimensional);

2.3.7. Potência na barra de tração

A potência na barra de tração é definida como o produto entre a força produzida na barra de tração pelo trator e a velocidade operacional do trator, que corresponde à velocidade translacional dos rodados (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, 2003). A potência na barra de tração foi obtida conforme a Equação 9.

$$P_B = F_T \cdot V_t \quad (9)$$

- Em que:
- P_B – potência na barra de tração (kW);
 - F_T – força de tração (kN);
 - V_t – velocidade translacional dos pneus ($m \cdot s^{-1}$).

2.3.8. Consumo específico de combustível

O consumo específico de combustível pode ser entendido como o consumo horário de combustível necessário para produzir uma unidade de potência na barra de tração do trator (FURTADO JÚNIOR, 2016). O consumo específico de combustível foi determinado conforme a Equação 10.

$$C_E = \frac{C_H}{P_B} \quad (10)$$

- Em que:
- C_E – consumo específico de combustível ($L \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$);
 - C_H – consumo horário de combustível ($L \cdot h^{-1}$);
 - P_B – potência na barra de tração (kW).

2.4. Análise estatística

Os dados coletados foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Em casos de interação entre os fatores realizou-se o desdobramento completo. Os fatores qualitativos foram analisados teste de comparação múltipla de Tukey a 5% de probabilidade. Modelos de regressão foram utilizados para descrever o comportamento da eficiência tratória e do consumo de combustível do trator em função da patinação para cada superfície. Os procedimentos estatísticos foram executados no programa computacional R (R CORE TEAM, 2020).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização das superfícies de tráfego

Os valores observados para umidade e densidade do solo estão apresentados na Tabela 3. O tratamento manejado sob cultivo mínimo apresentou o maior valor de umidade (21,50%) e o menor valor foi encontrado para o plantio direto (20,97%). Em termos de densidade do solo, a densidade de 1,34 g·cm⁻³ foi o maior valor, encontrado na superfície de plantio convencional. Seguindo de 1,23 e 1,14 g·cm⁻³, para plantio direto e cultivo mínimo, respectivamente.

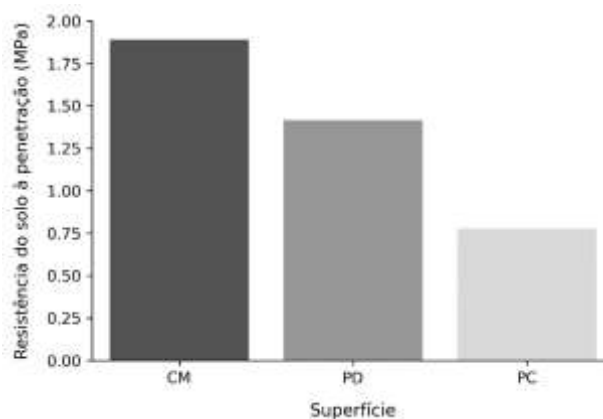
Tabela 3 – Umidade (%) e densidade (g·cm⁻³) observados para cada tratamento

Tratamento	Umidade (%)	Densidade (g·cm ⁻³)
Cultivo mínimo	21,5023	1,1443
Plantio convencional	21,0867	1,3367
Plantio direto	20,9727	1,2321

Fonte: O autor.

A Figura 9 apresenta os valores de resistência do solo à penetração obtidos para cada superfície de tráfego. O solo manejado sob cultivo mínimo (CM) apresentou resistência à penetração de 1,89 MPa, sendo o maior valor encontrado. As superfícies com tratamentos de plantio direto (PD) e plantio convencional (PC), apresentaram valores de 1,41 e 0,78 MPa, respectivamente.

Figura 9 – Resistência do solo à penetração em função do tipo de manejo (CM: cultivo mínimo; PC: plantio convencional; PD: plantio direto)



Fonte: O autor.

3.2. Análise dos parâmetros operacionais

A Tabela 4 apresenta um resumo dos resultados da análise de variância (ANOVA) para cada variável. Para todas as variáveis analisadas, houve efeito significativo decorrente da interação dos fatores superfície e carga ao nível de 1% pelo teste de Fisher (F). Portanto, a carga e a superfície de tráfego interagem entre si, influenciando todos os parâmetros operacionais avaliados. Procedeu-se com o desdobramento completo dos fatores nos itens seguintes.

Tabela 4 – Resumo da análise de variância (ANOVA) em função da superfície de tráfego (S) e da carga (C) para as variáveis avaliadas, média, desvio padrão e coeficiente de variação (CV). (FT: força de tração (kN); PT: patinagem (decimal); PB: potência na barra de tração (kW); CH: consumo horário de combustível ($L \cdot h^{-1}$); CE: consumo específico de combustível ($L \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$); ET: eficiência tratorária (decimal))

FV	GL	Quadrado Médio					
		FT	PT	PB	CH	CE	ET
Superfície (S)	2	5,9597**	0,1814**	92,5779**	0,2936**	0,6409**	0,0466**
Carga (C)	3	288,1413**	0,5774**	40,8456**	23,8219**	0,6309**	0,2518**
S x C	6	8,4023**	0,0330**	41,1302**	0,2483**	0,3598**	0,0865**
Resíduo	48	0,2305	0,001	0,7115	0,0149	0,0252	0,0036
Média	-	14,2576	0,1926	13,5766	8,9049	0,7138	0,6607
Desvio Padrão	-	3,9869	0,1991	3,1586	1,1219	0,333	0,1616
CV (%)	-	27,9633	103,41	23,265	12,5986	46,6461	24,4639

** significativo ao nível de 1% pelo teste de Fisher (F).

Fonte: O autor.

3.2.1. Força de tração

Conforme apresentado na Tabela 5, houve diferença significativa entre as médias para todas as cargas avaliadas. Nota-se que utilizar as marchas do trator-lastro como fonte de variação de carga constituiu uma faixa bem definida de forças médias de tração, pois houve diferença significativa entre cargas para todas superfícies avaliadas. O tratamento de cultivo mínimo não diferiu significativamente do plantio convencional para as cargas 1, 2 e 3. Em relação ao plantio direto, o plantio convencional não diferiu apenas para a carga 3, mesmo apresentando médias maiores para as cargas 1, 2 e 3. Durante a avaliação sob a carga 4, todas as médias diferiram entre superfícies.

Furlani *et al.* (2008) encontraram resultados parecidos ao avaliarem o desempenho de uma semeadora-adubadora em função do preparo do solo (preparo convencional e plantio direto), velocidade operacional e pressão de inflação dos pneus. Os autores encontram forças de tração 53% superiores no plantio direto em relação ao plantio convencional. Ao avaliar a demanda energética para plantio de milho em sistemas de plantio direto e preparo convencional, Gonçalves (2011) também encontrou força de tração superior para o plantio direto (18,730 kN) em relação ao preparo convencional (16,106 kN). Esses resultados podem estar ligados a uma maior resistência oferecida pelo solo no sistema de plantio direto.

Tabela 5 – Desdobramento da interação entre a carga e superfície de tráfego para a força de tração (kN) desenvolvida pelo trator (CM: cultivo mínimo; PC: plantio convencional; PD: plantio direto)

Carga	Superfície de tráfego		
	CM	PC	PD
Carga 1	10,3109 Da	10,2327 Da	9,4727 Db
Carga 2	12,1069 Cab	12,2745 Ca	11,6091 Cb
Carga 3	15,2446 Ba	14,5319 Ba	15,0500 Ba
Carga 4	20,5987 Ab	17,4700 Ac	22,1886 Aa

Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem entre si, pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: O autor.

3.2.2. Razão de redução de percurso (patinagem)

Para todos os sistemas de manejo avaliados, observou-se um aumento nas médias da razão de redução de percurso (patinagem) à medida que se aumentou a carga (Tabela 6). No entanto, não houve diferença significativa entre as cargas 1 e 2 em nenhum dos tratamentos. Para a carga 1, não ocorreu diferença significativa entre as áreas manejadas sob cultivo mínimo e plantio convencional. Para cargas mais elevadas (cargas 3 e 4), todas as médias diferem entre si, o que pode indicar influência da superfície de tráfego sobre os níveis de patinagem para esforços de tração maiores.

Em todos os cenários avaliados, os menores índices de razão de redução de percurso (patinagem) foram obtidos no solo manejado sob sistema de plantio direto. Os maiores valores ocorreram para o plantio convencional, enquanto a superfície de cultivo mínimo apresentou índices de patinagem intermediários, para todas as cargas avaliadas. Simikić *et al.* (2014) também encontraram índices de patinagem superiores em solos com revolvimento, quando comparados com solos não revolvidos. Esse resultado condiz com a abordagem proposta por Bekker (1956), em seu trabalho pioneiro na área de relação máquina-solo, que demonstrou a relação entre força de cisalhamento do solo e patinagem dos pneus, em diferentes condições de solo.

Tabela 6 – Desdobramento da interação entre a carga e superfície de tráfego para a patinagem (decimal) dos pneus (CM: cultivo mínimo; PC: plantio convencional; PD: plantio direto)

Carga	Superfície de tráfego		
	CM	PC	PD
Carga 1	0,0706 Ca	0,0842 Ca	0,0205 Cb
Carga 2	0,0869 Cb	0,1109 Ca	0,0285 BCc
Carga 3	0,1690 Bb	0,2479 Ba	0,0529 Bc
Carga 4	0,4879 Ab	0,6843 Aa	0,2671 Ac

Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem entre si, pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: O autor.

3.2.3. Potência na barra de tração

Os valores de potências médias disponibilizadas na barra de tração foram apresentados na Tabela 7. Para a área de cultivo mínimo, não houve diferença significativa para as cargas 2 e 4, sendo que, para carga 4, as potências médias também não diferiram estaticamente da carga 1. Considerando a área de plantio convencional, não houve diferença significativa para as cargas 1, 2 e 3. A potência média de 6,85 kW, disponibilizada na barra de tração durante a carga 4, foi a única que apresentou diferença significativa no plantio convencional. Na superfície de tráfego manejada sob plantio direto, houve aumento das potências médias à medida em que a carga aumentou, apresentando diferença significativa sobre as quatro condições de carga avaliadas.

Durante a avaliação sob as cargas 1 e 2, as médias não diferiram significativamente entre as três superfícies. Esse resultado pode estar relacionado às forças de tração expostas na Tabela 5, que foram bem próximas nessas condições. Porém, para cargas mais elevadas (3 e 4) houve diferença significativa entre todas as condições de solo avaliadas, sendo que as maiores médias foram encontradas para a superfície de plantio direto. Furlani, Lopes e Silva (2005) também encontraram potências superiores para solo manejado em plantio direto, em relação ao cultivo mínimo e preparo convencional.

Tabela 7 – Desdobramento da interação entre a carga e superfície de tráfego para a potência na barra de tração (kW) disponibilizada pelo trator (CM: cultivo mínimo; PC: plantio convencional; PD: plantio direto)

Carga	Superfície de tráfego		
	CM	PC	PD
Carga 1	11,9850 Ca	11,7280 Aa	11,6448 Da
Carga 2	13,7395 Ba	13,6028 Aa	14,1801 Ca
Carga 3	15,8639 Ab	13,4600 Ac	17,7914 Ba
Carga 4	12,8382 BCb	6,8502 Bc	19,2354 Aa

Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem entre si, pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: O autor.

3.2.4. Consumo horário de combustível

Conforme apresentado na Tabela 8, observa-se que as médias de consumo horário de combustível diferiram significativamente em todas as três superfícies avaliadas, ao variar a carga. As médias das superfícies de plantio convencional e plantio direto diferiram entre si para todas as cargas avaliadas. O cultivo mínimo apresentou valores intermediários em relação as outras duas superfícies para as cargas 1, 2 e 3. A única condição onde todas três superfícies diferiram entre si foi durante a carga 1. A menor média de consumo horário ocorreu durante a carga 1, para a superfície de plantio direto ($7,39 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$), que também obteve a maior média global, durante a carga 4 ($10,75 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$).

Tabela 8 – Desdobramento da interação entre a carga e superfície de tráfego para o consumo horário de combustível ($\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$) do trator (CM: cultivo mínimo; PC: plantio convencional; PD: plantio direto)

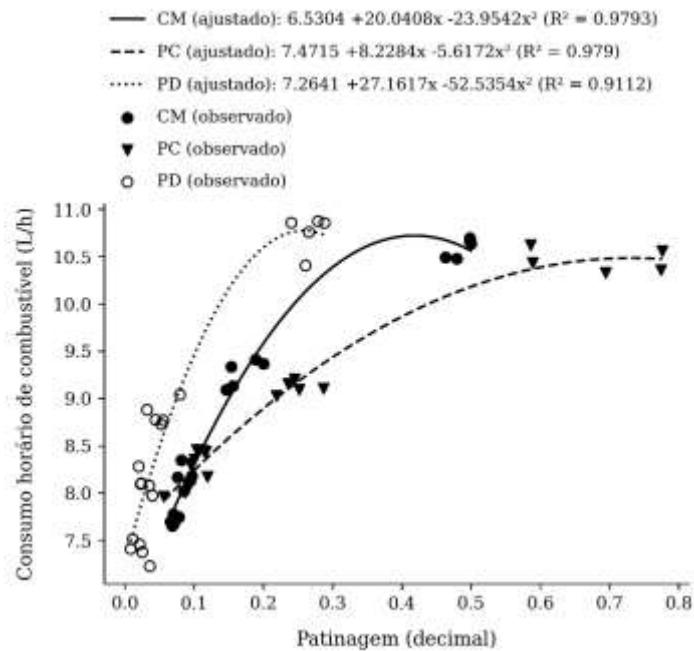
Carga	Superfície de tráfego		
	CM	PC	PD
Carga 1	7,7090 Db	8,0847 Da	7,3944 Dc
Carga 2	8,1683 Cb	8,3719 Ca	8,1047 Cb
Carga 3	9,2677 Ba	9,1164 Ba	8,8371 Bb
Carga 4	10,5942 Aab	10,4599 Ab	10,7500 Aa

Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem entre si, pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: O autor.

A Figura 10 apresenta os dados de consumo horário de combustível em função da patinagem. Foram ajustadas equações de regressão para cada superfície avaliada. Observa-se que as superfícies onde o solo é mais consolidado (cultivo mínimo e plantio direto) apresentaram tendências de consumo horário de combustível superiores à superfície de solo mobilizado (plantio convencional). Esse resultado também foi encontrado por Souza (2013), ao avaliar o desempenho de um trator agrícola em pista de concreto e solo mobilizado. Souza (2013) ressalta que o consumo horário de combustível não é um parâmetro indicado para a avaliar o desempenho de um trator, uma vez que não considera a quantidade de trabalho realizado pelo trator.

Figura 10 – Consumo horário de combustível em função da patinagem para cada superfície (CM: cultivo mínimo; PC: plantio convencional; PD: plantio direto)



Fonte: O autor.

3.2.5. Consumo específico de combustível

As menores médias de consumo específico de combustível foram encontradas para a área manejada sob plantio direto, no entanto, para as cargas 1 e 2 não houve diferença significativa em relação ao cultivo mínimo (Tabela 9). Para a superfície de preparo convencional houve diferença significativa apenas para média de $1,67 \text{ L} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, obtida para a carga 4, sendo o maior valor encontrado para consumo específico de combustível. Nota-se que esse resultado é esperado, pois foi calculado a partir da média de 6,85 kW, a menor apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 – Desdobramento da interação entre a carga e superfície de tráfego para o consumo específico de combustível ($L \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$) do trator (CM: cultivo mínimo; PC: plantio convencional; PD: plantio direto)

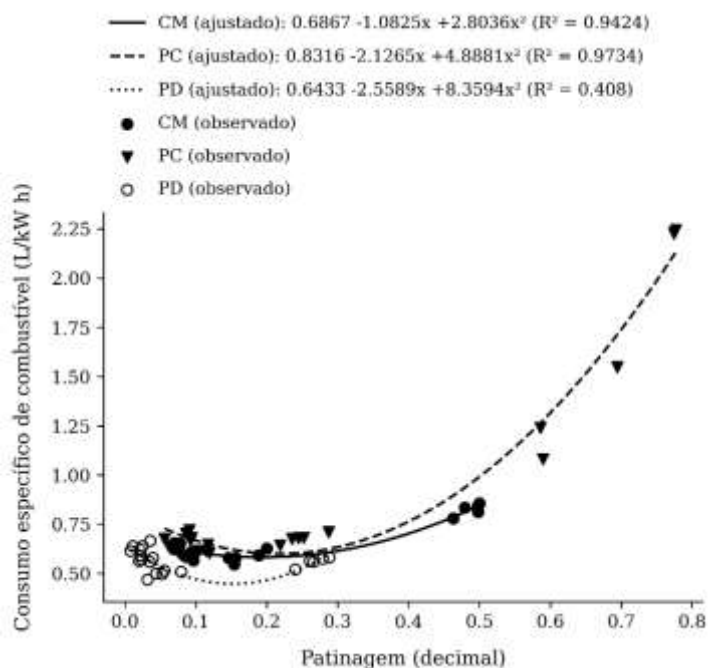
Carga	Superfície de tráfego		
	CM	PC	PD
Carga 1	0,6434 Bb	0,6900 Ba	0,6356 Ab
Carga 2	0,5951 Cab	0,6159 Ba	0,5718 Bb
Carga 3	0,5853 Cb	0,6779 Ba	0,4972 Cc
Carga 4	0,8260 Ab	1,6678 Aa	0,5598 Dc

Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem entre si, pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: O autor.

A Figura 11 apresenta os dados de consumo específico de combustível em função da patinação. Foram ajustadas equações de regressão para cada superfície avaliada. Conforme as médias apresentadas na Tabela 9, é possível observar, na Figura 11, que a superfície de plantio convencional apresentou maior consumo específico, seguida pelo cultivo mínimo e plantio convencional, que apresentou os menores valores. Resultados semelhantes foram encontrados por Souza (2013) e Monteiro (2011). Observa-se, ainda, que a Equação ajustada para a superfície de plantio direto não descreve bem o conjunto de dados, apresentando R^2 de 0,408.

Figura 11 – Consumo específico de combustível em função da patinação para cada superfície (CM: cultivo mínimo; PC: plantio convencional; PD: plantio direto)



Fonte: O autor.

3.2.6. Eficiência tratória

Conforme apresentado na Tabela 10, a maior eficiência tratória média foi de 0,80 e ocorreu durante a carga 2 para a superfície de cultivo mínimo. Nota-se que, nessa condição, a patinagem (apresentada na Tabela 6) foi de 0,09. Esse resultado condiz com a faixa de patinagem sugerida por diversos autores como ótima, em termos de eficiência tratória (DAMANAUSKAS; JANULEVIČIUS; PUPINIS, 2015; EKINCI; ÇARMAN, 2017; GUPTA *et al.*, 2019; MOITZI *et al.*, 2013).

A superfície de cultivo mínimo também apresentou a maior média para a carga 1, seguido de plantio convencional e plantio direto. Em relação ao plantio direto, esse resultado pode estar ligado à média de 0,02 para patinagem durante a carga 1 (apresentado na Tabela 6). Diversos autores afirmam que para valores menores que 0,08 de patinagem, a eficiência tratória é limitada pelas perdas associadas à resistência ao rolamento (DAMANAUSKAS; JANULEVIČIUS; PUPINIS, 2015; EKINCI; ÇARMAN, 2017; GUPTA *et al.*, 2019; MOITZI *et al.*, 2013).

O solo manejado sob sistema de plantio direto apresentou as menores médias para as cargas 1 e 2, porém, se mostrou mais eficiente para as cargas 3 e 4. No entanto, não houve diferença significativa para a carga 3 entre o cultivo mínimo e o plantio direto. A menor eficiência tratória média foi 0,27, e ocorreu para a carga 4 na superfície de plantio convencional.

Tabela 10 – Desdobramento da interação entre a carga e superfície de tráfego para eficiência tratória (decimal) apresentada pelo trator (CM: cultivo mínimo; PC: plantio convencional; PD: plantio direto)

Carga	Superfície de tráfego		
	CM	PC	PD
Carga 1	0,7997 Aa	0,7518 Aa	0,5641 Bb
Carga 2	0,8001 Aa	0,7538 Aa	0,6789 Abb
Carga 3	0,7547 Ba	0,6619 Bb	0,7600 Aa
Carga 4	0,4674 Cb	0,2707 Cc	0,6654 Aba

Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem entre si, pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

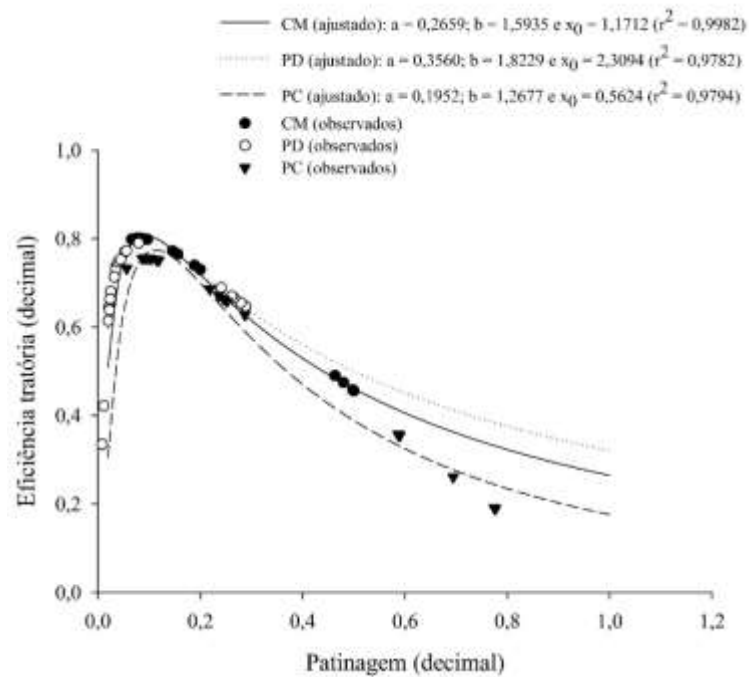
Fonte: O autor.

A Figura 12 apresenta os dados de eficiência tratória em função da patinagem. Os modelos foram ajustados conforme a Equação 11. Nota-se que os maiores valores de eficiência tratória são obtidos para valores de patinagem próximos a 0,1, conforme relatado por diversos autores (DAMANAUSKAS; JANULEVIČIUS; PUPINIS, 2015; EKINCI; ÇARMAN, 2017; GUPTA et al., 2019; MOITZI et al., 2013). Os solos mais consolidados (cultivo mínimo e plantio direto) apresentaram melhor eficiência tratória quando comparados ao solo mobilizado (preparo convencional). Esse resultado também foi encontrado por Lyasko (2010).

$$y = \frac{a}{x} \cdot \exp \left\{ -0,5 \left[\frac{\ln(x/x_0)}{b} \right]^2 \right\} \quad (11)$$

Em que: y – valor de eficiência tratória previsto (decimal);
 x – valor de eficiência tratória observado (decimal);
 x₀, a, b – parâmetros ajustados para cada superfície (adimensional).

Figura 12 – Eficiência tratória em função da patinação para cada superfície (CM: cultivo mínimo; PC: plantio convencional; PD: plantio direto)



Fonte: O autor.

Na Figura 12, observa-se o efeito da patinação e da superfície de tráfego sobre a eficiência tratória. Conforme concluído por Gabriel Filho *et al.* (2004), a cobertura do solo pode interferir na capacidade do trator em desenvolver esforço para tracionar máquinas e implementos, influenciar na patinação e na eficiência tratória.

4. CONCLUSÕES

- A força de tração, patinação, potência na barra de tração, consumos horário e específico de combustível e eficiência tratoria foram influenciadas em decorrência da interação dos fatores superfície de tráfego e carga.
- O solo manejado sob plantio convencional apresentou os maiores valores de patinação, seguido do cultivo mínimo e plantio direto.
- A carga influenciou no consumo horário de combustível.
- O maior consumo específico de combustível ocorreu no plantio convencional ($1,67 \text{ L}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) e o menor no plantio direto ($0,50 \text{ L}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$).
- A maior eficiência tratoria (0,80) ocorreu na superfície de cultivo mínimo, e a menor no plantio convencional (0,27).
- As superfícies mais consolidadas (plantio direto e cultivo mínimo) apresentaram desempenho operacional superior para os parâmetros avaliados, em relação à superfície de solo mobilizado (plantio convencional).

5. REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASAE D497.7**: Agricultural Machinery Management Data. Saint Joseph, 2011.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASAE EP542.1**: Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer. Saint Joseph, 2019.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASAE S296.5**: General terminology for traction of agricultural traction and transport devices and vehicles. Saint Joseph, 2003.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASABE S313.3**: Soil cone penetrometer. Saint Joseph, 2018.
- BATTIATO, A.; ALAOUI, A; DISERENS, E. Impact of normal and shear stresses due to wheel slip on hydrological properties of an agricultural clay loam: experimental and new computerized approach. **Journal of Agricultural Science**, v. 47, n. 4, p. 1-19, 2015.
- BATTIATO, A.; DISERENS, E. Influence of Soil on the Traction Performance of a 65 kW MFWD Tractor. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 17, p. 11-27, 2019
- BATTIATO, A.; DISERENS, E. Tractor traction performance simulation on differently textured soils and validation: A basic study to make traction and energy requirements accessible to the practice. **Soil and Tillage Research**, v. 166, p. 18-32, 2017.
- BEKKER, G. M. **Theory of land locomotion**: The mechanics of vehicle mobility. University of Michigan Press, Michigan, 1956.
- BOTTA, G. F.; TOLON-BECERRA, A.; TOURN, M.; LASTRA-BRAVO, X.; RIVERO, D. Agricultural traffic: Motion resistance and soil compaction in relation to tractor design and different soil conditions. **Soil and Tillage Research**, v. 120, p. 92-98, 2012.
- DAMANAUSKAS, V.; JANULEVIČIUS, A.; PUPINIS, G. Influence of extra weight and tire pressure on fuel consumption at normal tractor slippage. **Journal of Agricultural Science**, v. 7, n. 2, p 55-67, 2015.
- DISERENS, E; BATTIATO, A; SARTORI, L. Soil compaction, soil shearing and fuel consumption, TASC V3.0 - A practical tool for decision-making in farming. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF AGRICULTURAL ENGINEERING, 2014, Zürich. **Proceedings...** Zürich: The European Society of Agricultural Engineers, ref. c0528.
- EKINCI, S.; ÇARMAN, K. Effects Of Some Properties Of Drive Tires Used In Horticultural Tractors On Tractive Performance. **Journal of Agricultural Sciences**, v. 23, n. 1, p. 84-94, 2017.
- EKINCI, Ş; ÇARMAN, K.; KAHRAMANLI, H. Investigation and modeling of the tractive performance of radial tires using off-road vehicles. **Energy**, v. 93, p. 1953-1963, 2015.
- FURLANI, C. E. A.; LOPES, A. SILVA, R. P. da. Avaliação de semeadora-adubadora de precisão trabalhando em três sistemas de preparo do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 458-464, 2005.

- FURLANI, C. E. A.; SILVA, R. P. D.; CARVALHO FILHO, A.; CORTEZ, J. W.; GROTTA, D. C. C. Semeadora-adubadora: exigências em função do preparo do solo, da pressão de inflação do pneu e da velocidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 345-352, 2008.
- FURTADO JÚNIOR, M. R. **Análise operacional de um trator agrícola em função da pressão interna dos pneus e inclinação da linha de tração**. 2013. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.
- FURTADO JÚNIOR, M. R. **Desenvolvimento de uma plataforma dinamométrica para ensaios de tração em implementos montados**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2016.
- GABRIEL FILHO, A.; SILVA, S.; de L.; MODOLO, A. J. SILVEIRA, J. C. M. da. Desempenho de um trator operando em solo com diferentes tipos de cobertura vegetal. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 3, p. 781-789, 2004.
- GONÇALVES, W. S. **Demanda energética para o plantio do milho em sistemas convencional e direto**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.
- GUPTA, C.; TEWARI, V. K.; KUMAR, A. A.; SHRIVASTAVA, P. Automatic tractor slip-draft embedded control system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 165, 2019.
- HEGAZY, S.; SANDU, C. Experimental investigation of vehicle mobility using a novel wheel mobility number. **Journal of Terramechanics**, v. 50, p. 303-310, 2013.
- JANULEVIČIUS, A.; DAMANAUSKAS, V. How to select air pressures in the tires of MFWD (mechanical front-wheel drive) tractor to minimize fuel consumption for the case of reasonable wheel slip. **Energy**, v. 90, p. 691-700, 2015.
- KELLER, T.; ARVIDSSON, J. A model for prediction of vertical stress distribution near the soil surface below rubber-tracked undercarriage systems fitted on agricultural vehicles. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 116–123, 2016.
- KIM, W. S.; KIM, Y. S.; KIM, Y. J. Development of prediction model for axle torque of agricultural tractors. **Transactions of the ASABE** (in press), 2020.
- KOCHER, M. F.; SMITH, B. J.; HOY, R. M.; WOLDSTAD, J. C.; PITLA, S. K. Fuel Consumption Models for Tractor Test Reports. **Transactions of the ASABE**, v. 60, n. 3, p. 693–701, 2017.
- KUMAR, S.; PANDEY, K. P.; KUMAR, R.; KUMAR, A. A. Effect of ballasting on performance characteristics of bias and radial ply tyres with zero sinkage. **Measurement**, v. 121, p. 218-224, 2018.
- LYASKO, M. I. How to calculate the effect of soil conditions on tractive performance. **Journal of Terramechanics**, v. 47, n. 6, p. 423-445, 2010.
- MOITZI, G.; HAAS, M.; WAGENTRISTL, H.; BOXBERGER, J.; GRONAUER, A. Energy consumption in cultivating and ploughing with traction improvement system and consideration of the rear furrow wheel-load in ploughing. **Soil and Tillage Research**, v. 134, p. 56-60, 2013.

MONTEIRO, L. A. **Desempenho operacional e energético, segundo a norma OECD – Código 2 de dois tratores agrícolas 4x2 tda com motores de 132 kw em pista concreto e solo agrícola**, 2011. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2011.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2020. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 10 nov. 2020.

RANJBARIAN, S.; ASKARI, M.; JANNATKHAH, J. Performance of tractor and tillage implements in clay soil. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 16, n. 2, p. 154-162, 2017.

SHAFAEI, S. M.; LOGHAVI, M.; KAMGAR, S. An extensive validation of computer simulation frameworks for neural prognostication of tractor tractive efficiency. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 155, p. 283-297, 2018.

SIMIKIĆ, M.; NEBOJŠA, D.; LAZAR, S.; MILAN, T.; ONDREJ, P. Power delivery efficiency of a wheeled tractor at oblique drawbar force. **Soil and Tillage Research**, v. 141, p. 32-43, 2014.

ŠMERDA, T.; ČUPERA, J. Tire inflation and its influence on drawbar characteristics and performance—Energetic indicators of a tractor set. **Journal of Terramechanics**, v. 47, n. 6, p. 395-400, 2010.

SOUZA, F. H. D. **Desempenho energético de um trator agrícola 4x2–TDA, em função da pressão de inflação dos pneus em pista de concreto e em solo mobilizado, conforme a norma OECD–código 2**, 2013. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2013.

SOYLU, S.; ÇARMAN, K. Automatic control of wheel slip in soil tillage. **Nigde Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences**, v. 9, n. 2, p. 848-858, 2020.

SPAGNOLO, R.T.; PALMA, M.A.Z.; VOLPATO, C.E.S.; BARBOSA, J.A.; NUNES, R.A. Operational performance of an agricultural tractor as a function of weight, inflation pressure and tire life. **Engenharia na Agricultura**, v. 21, n. 4, 2013.

TAGHAVIFAR, H.; MARDANI, A. Applying a supervised ANN (artificial neural network) approach to the prognostication of driven wheel energy efficiency indices. **Energy**, v. 68, p. 651-657, 2014.

TAGHAVIFAR, H.; MARDANI, A. Net traction of a driven wheel as affected by slippage, velocity and wheel load. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 14, n. 2, p. 167-171, 2015.

TEIXEIRA P. C.; DONAGEMMA G. K.; FONTANA A.; TEIXEIRA W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 573 p.

VAN LINDEN, V.; HERMAN, L. A fuel consumption model for off-road use of mobile machinery in agriculture. **Energy**, v. 77, p. 880-889, 2014.