

Sistema radicular e componentes produtivos do girassol em solo compactado

Root system and productive components of the sunflower in a compacted soil

Alex Scapinelli*, Filipe Rafaeli Deina, Daniel Dias Valadão Junior, Franciele Caroline Assis Valadão, Luciane Belmonte Pereira

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso - Agronomia - Campo Novo do Parecis (MT), Brasil.

RESUMO: Objetivou-se neste trabalho verificar alterações morfológicas e anatômicas no sistema radicular do girassol, bem como nos seus atributos produtivos em função da compactação adicional provocada pelo tráfego de trator em um Latossolo Vermelho distrófico típico. A pesquisa foi realizada a campo, sendo os tratamentos referentes a 5 níveis de compactação: sem tráfego adicional (C0); 1 (C1); 3 (C3); 6 (C6) e 11 (C11) passadas de trator. Foram avaliadas as propriedades físicas do solo e a distribuição das raízes nas camadas de 0 – 0,05; 0,05 – 0,10; 0,10 – 0,15 e 0,15 – 0,20 m de profundidade, além das características vegetativas e reprodutivas e as alterações anatômicas das raízes. A compactação do solo pelo tráfego de máquinas promove diminuição do índice de área radicular (IAR) do girassol. A distribuição das raízes do girassol ocorre de forma superficial no perfil do solo e foi diminuída pela metade quando submetida à C11. A compactação do solo proporcionou modificações anatômicas nas raízes, com alteração do diâmetro de vasos, aparecimento de células xilemáticas angulosas, esmagamento do câmbio vascular e surgimento de aerênquimas, típico em raízes submetidas a hipóxia. As plantas apresentaram menores altura, altura de capítulo, diâmetro da haste, produtividade e massa de aquênios, havendo redução na população. Verificou-se a correlação linear negativa entre produtividade e resistência do solo à penetração, sendo 0,733 MPa considerado como valor crítico, e correlação linear positiva entre macroporosidade e IAR, sendo 0,264 m³·m⁻³ considerado como valor crítico.

Palavras-chave: *Helianthus annuus*, alterações anatômicas, índice de área radicular.

ABSTRACT: The aim of this research was to verify morphologic and anatomic changes in the root system of the sunflower as well as its productive attributes in function of the additional compression caused by tractor traffic in a typical Kandiuoxol (Oxisol). The research was conducted in the field, in 5 levels of compression: without additional traffic (C0); 1 (C1); 3 (C3); 6 (C6) and 11 (C11) paths of tractor. The physical properties of the soil and the distribution of the roots in the layers 0 – 0.05; 0.05 – 0.10; 0.10 – 0.15 and 0.15 – 0.20 m of depth were evaluated, besides the vegetal and reproductive characteristics and the anatomic changes in the roots. The soil compression by the machine traffic results in the reduction in the root area index (RAI) of the sunflower. The distribution of the sunflower's roots occurs superficially in the soil's profile and was reduced by a half when submitted to C11. The soil compression resulted in anatomic alterations in the roots, with changes in the diameter of the ducts, emerging of angle xilematic cells, crushing in the vascular cambium and occurrence of aerenchyma, typical in roots submitted to hypoxia. The plants presented less height, flower height, stem diameter, productivity and achenes mass, occurring a reduction in plant population. It was verified negative linear correlation between productivity and soil resistance to penetration, being 0.733 MPa a critical value, and positive linear correlation between macroporosity and RAI, with 0.264 m³·m⁻³ considered as a critical value.

Key words: *Helianthus annuus*, anatomic alterations, root area index.

*Autor correspondente: alex.scapinelli@hotmail.com

Recebido: 6 Jul. 2015 – Aceito: 17 Fev. 2016

INTRODUÇÃO

O manejo do solo e o método de cultivo causam alterações físicas, químicas e estruturais nos solos agrícolas (Freddi et al. 2007b; Malavolta 2006; Pagliai et al. 2003). Atualmente, com a crescente adoção de sistemas conservacionistas, que empregam o não revolvimento do solo e a manutenção da cobertura vegetal, tem sido aumentada também a incidência de áreas compactadas nos sistemas produtivos (Klein e Boller 1995).

A compactação do solo é caracterizada pelo aumento de sua densidade (Ds), o que reflete maiores valores de resistência do solo à penetração (RSP), maior retenção de água, redução da porosidade, da difusão dos gases e da disponibilidade de nutrientes (Pagliai et al. 2003; Beutler e Centurion 2004; Freddi et al. 2007b; Bergamin et al. 2010; Valadão et al. 2015). Valadão et al. (2015) verificaram que a compactação restringe o volume de solo explorado devido ao sistema radicular superficial, o que pode prejudicar a absorção de água e nutrientes, principalmente daqueles dependentes da difusão como o fósforo, o potássio e o zinco (Malavolta 2006).

Para auxiliar o manejo dessas áreas compactadas, pesquisas têm tentado determinar níveis críticos das propriedades físicas do solo para o adequado desenvolvimento das plantas, utilizando-se principalmente a RSP (Taylor et al. 1966; Beutler e Centurion 2004; Bergamin et al. 2010; Valadão et al. 2015). O valor de 2,0 MPa, proposto por Taylor et al. (1966), há tempos é adotado como referência limitante ao desenvolvimento das raízes, mas muitos trabalhos mostram resultados diferentes. Para Bergamin et al. (2010), uma RSP de 0,64 MPa e Ds de 1,32 Mg·m⁻³ são consideradas limitantes ao desenvolvimento das raízes de milho. Já para Valadão

et al. (2015), esses valores são de 1,48 MPa e 1,32 Mg·m⁻³ para o desenvolvimento das raízes de milho e de 1,84 MPa e 1,35 Mg·m⁻³ para a soja.

Como alternativa de estudo e com intuito de entender melhor a resposta desses solos, alguns autores têm adotado metodologias complementares às análises físicas do solo, como análises de atividade de enzimas e de anatomia (Iijima e Kato 2007; Mostajeran e Rahimi-Eichi 2008). O trabalho de Iijima e Kato (2007) é um exemplo — os autores submeteram as raízes de milho, arroz, ervilha e algodão às condições de estresse físico do solo por seca, anaerobiose e impedância mecânica e concluíram que o algodão é a espécie que apresenta melhor desenvolvimento das raízes em condição de solo compactado. Esse tipo de trabalho tem formado base conceitual importante na abordagem da dinâmica dos solos compactados, facilitando o entendimento de tais problemas.

Diante do exposto, objetivou-se neste trabalho verificar alterações morfológicas e anatômicas no sistema radicular do girassol, bem como nos seus atributos vegetativos e produtivos em função da compactação adicional provocada pelo tráfego de trator em um Latossolo Vermelho distrófico típico.

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada a campo, no período de Março a Junho (2ª safra) de 2014, em Latossolo Vermelho distrófico típico (Embrapa 2013), nas seguintes coordenadas geográficas: lat 13°40'41"S; long 57°47'25"O e 561 m de altitude. O clima da região pela classificação de Köppen é o Aw (Ferreira 2001), e os dados de precipitação e pluviosidade do período encontram-se na Figura 1. As características químicas do solo, na camada de 0,0 a 0,20 m, eram: pH_{CaCl₂} = 5,4;

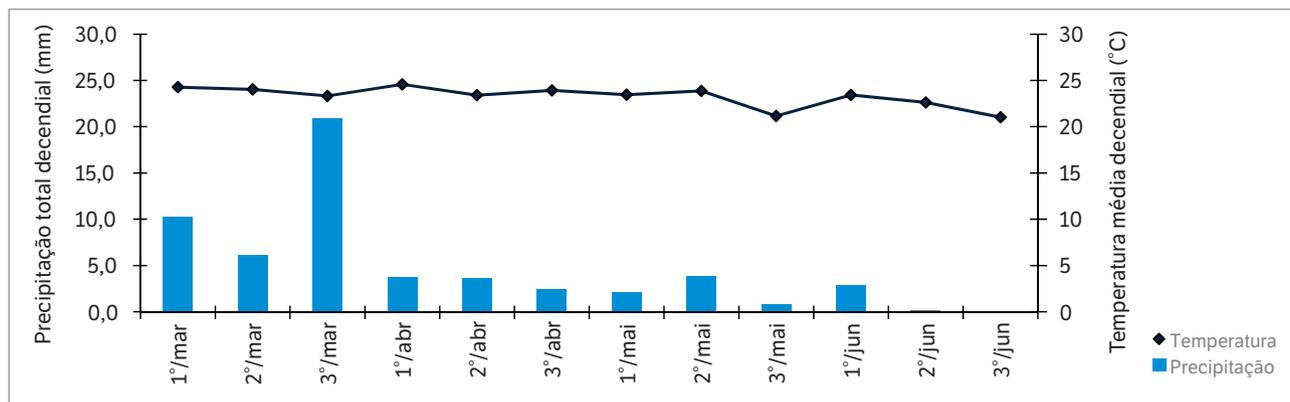


Figura 1. Precipitação pluvial e temperatura média do ar, decendiais, na área de realização da pesquisa durante o período de Março a Junho. 1º; 2º e 3º = Decêndio de cada mês. Campo Novo do Parecis, MT, 2014.

$P = 16,9 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$; $K = 29 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$; $\text{Ca} = 3,1 \text{ cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$; $\text{Mg} = 1,1 \text{ cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$; $\text{Al} = 0,0 \text{ cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$; $\text{H} = 3,1 \text{ cmol}_c\cdot\text{dm}^{-3}$; $\text{MO} = 21,2 \text{ g}\cdot\text{dm}^{-3}$ ($\text{COT} = 12,3 \text{ g}\cdot\text{dm}^{-3}$); areia, silte e argila = 360; 134 e $506 \text{ g}\cdot\text{dm}^{-3}$, respectivamente.

O delineamento adotado foi o de blocos completos casualizados com 5 tratamentos e 5 repetições. Os tratamentos referem-se às compactações proporcionadas pelo tráfego adicional na área, sendo: sem tráfego adicional (C0); 1 (C1); 3 (C3); 6 (C6) e 11 (C11) passadas de trator. Cada parcela teve 5,0 m de comprimento por 3,6 m de largura, perfazendo uma área total de 18 m^2 .

A indução às compactações do solo foi realizada em Março, quando o solo de toda a área foi subsolado, gradeado e posteriormente compactado conforme cada tratamento. Na compactação, foi utilizado um trator agrícola MF 292 (105 CV), com rodado de pneus diagonais e massa total de 5 Mg, com pressão de inflação de 96 kPa nos pneus dianteiros (14.9-24 R1) e 110 kPa nos pneus traseiros (19.4-34 R1), sendo 39% da massa distribuída no eixo dianteiro e 61% no eixo traseiro. A compactação foi realizada por meio da passagem dos rodados desse trator, perfazendo toda a superfície da parcela, de forma que os pneus comprimiram áreas paralelas entre si, variando o número de passadas em função do tratamento.

Após a implantação das compactações, foi feita a semeadura do girassol, cultivar Olissum-3, híbrido triplo de ciclo semiprecoce. O espaçamento utilizado foi de 0,45 m entre linhas e 4 sementes por metro, com profundidade de semeadura de 0,03 m. Foram utilizados como adubação e base 20 kg de N, 60 kg de P_2O_5 e 40 kg de K_2O aplicados no momento da semeadura, utilizando-se a fórmula comercial 10-30-20. Aos 20 dias após a emergência (DAE), foram aplicados mais 50 kg de N na forma de ureia (45% de N) como adubação de cobertura e, aos 30 DAE, foram aplicados $2 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de B na forma de ácido bórico (17% de B).

No período do pleno florescimento do girassol, foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0 – 0,05; 0,05 – 0,10; 0,10 – 0,15 e 0,15 – 0,20 m, utilizando-se um anel extrator de 0,04 m de altura e 0,05 m de diâmetro, forçado verticalmente no solo, por meio de um amostrador tipo castelinho, com o uso de uma marreta de 2 kg. Nessas amostras, foram avaliadas as propriedades físicas: Ds, porosidade total (Pt), macroporosidade (Mac) e microporosidade (Mic), de acordo com Embrapa (2011). A RSP foi medida a campo por um penetrógrafo eletrônico automático com velocidade de penetração constante de $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ e cone de $129,28 \text{ mm}^2$

de área de base, conforme Bianchini et al. (2002). Juntamente com a RSP, foram obtidas amostras de solo para determinação da umidade gravimétrica (UG).

O sistema radicular foi avaliado em cada parcela, abrindo-se uma trincheira transversal a uma linha de cultivo, onde a parede vertical da trincheira ficou a 0,05 m da planta e a raiz desta foi exposta através da lavagem com água. O perfil foi dividido em quadrículas, com auxílio de uma malha de 0,45 por 0,2 m, colocada em pleno contato com o solo. Foi efetuada a fotografia do perfil com uma câmera digital (12 megapixels); posteriormente, as raízes foram avaliadas nas profundidades previstas nas coletas de amostras indeformadas, quanto ao diâmetro radicular (DR; mm), área radicular (AR; mm^2) e índice de área radicular (IAR; $\text{mm}^2\cdot\text{m}^{-2}$) pela técnica de limiarização (*thresholding*) através do programa computacional SAFIRA (Jorge e Silva 2010).

Na sequência, foram avaliadas as seguintes características (Poletine et al. 2013):

- Altura de planta (AP; cm), medida com trena do nível do solo até a inserção do capítulo no florescimento pleno, R5.
- População de plantas (PP; $\text{plantas}\cdot\text{ha}^{-1}$), calculada por contagem das plantas nas 2 linhas centrais de 4 m (área útil), no início da maturação, R9.
- Diâmetro da haste (DH; mm), medido com paquímetro digital a 5 cm do nível do solo, em 5 plantas da área útil, em R5.
- Altura do capítulo (AC; cm), medida com trena do nível do solo até a base do capítulo, em R9.
- Produção de massa seca (MS; $\text{g}\cdot\text{planta}^{-1}$), medindo-se a massa de 5 plantas coletadas continuamente em R9, fora da área útil e da bordadura, após secagem em estufa até peso constante.
- Diâmetro médio do capítulo (DC; cm), medindo-se com paquímetro digital os capítulos das mesmas plantas utilizadas na avaliação da MS.
- Massa do capítulo (MC; g), medindo-se a massa dos capítulos das 5 plantas utilizadas para MS.
- Produtividade de aquênios por hectare (PR; $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), determinada nas plantas da área útil, com a colheita manual dos capítulos em R9, secagem natural, trilha mecânica, pesagem e correção da umidade para 11%, base úmida (b.u.).
- Massa de 100 aquênios (ME; g), determinada mediante coleta ao acaso e pesagem de uma amostra de 100 aquênios da PR (umidade de 11%, b.u.).

Para a avaliação das alterações anatômicas, foram coletadas amostras de raízes secundárias da camada entre 0,0 e 0,10 m de profundidade. As raízes foram coletadas, lavadas, cortadas em fragmentos de 0,05 m, fixadas em solução de FAA 70% (formaldeído, ácido acético e álcool etílico a 70%) (Johansen 1940) e armazenadas em geladeira. Em seguida, foi feita a desidratação em série alcoólica com butanol terciário; o material foi embebido inicialmente em parafina e posteriormente em parplast. Os cortes foram realizados em micrótomo de deslize com 14 µm de espessura. A coloração dos cortes foi feita com Astrablau (solução de safranina e azul de astra 7,5:2,5) e estes foram montados em lâminas com gelatina de Kaiser (Kraus e Arduin 1997). As imagens foram obtidas por meio de microscópio de ocular micrométrica, tendo sido avaliadas qualitativamente, conforme Gostin (2009).

Os resultados foram submetidos a análise de variância e, quando F era significativo ($p < 0,05$), foi aplicada regressão para as faixas de compactação, utilizando-se o programa estatístico Sisvar (Ferreira 2011). As correlações lineares simples foram feitas através do programa computacional BIOESTAT 5, fazendo-se combinações 2 a 2 das variáveis analisadas, por meio do teste *t*, e utilizadas quando $p < 0,05$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resumo da significância das variáveis físicas do solo e de crescimento radicular analisadas encontra-se na Tabela 1.

As propriedades físicas do solo (Ds, Pt, Mac, Mic e RSP) foram alteradas em todas as camadas de profundidade em função do tráfego do trator, exceto pela Mic, que não se alterou nas camadas de 0,0 – 0,05 e 0,10 – 0,15 m. Não houve diferença quanto à UG sendo, portanto, possível comparar os valores de RSP. A distribuição das raízes (AR e IAR) foi influenciada pelas passadas de trator entre 0,0 e 0,10 m de profundidade; abaixo disso (entre 0,10 e 0,20 m), não houve influência da compactação do solo. O diâmetro radicular (DR) alterou-se apenas na camada de 0,05 – 0,10 m de profundidade. Como na camada de 0,05 – 0,10 m todos os atributos avaliados sofreram modificações, pode-se inferir que a compactação do solo pelo tráfego de tratores provoca efeitos mais expressivos nessa camada.

O tráfego adicional do trator promoveu aumento da Ds a partir de C1 (Figura 2a), inclusive em profundidade, caracterizando a compactação do solo. Na camada de 0,0 – 0,05 m, foram observadas as maiores variações de Ds, que inicialmente diminuíram (C1) e, em seguida, aumentaram (C3, C6 e C11). Esse fenômeno se deve à ação cisalhante do pneu radial sobre a camada superficial (0,0 – 0,05 m) nas primeiras passadas do trator, efeito dependente da pressão de inflação dos pneus (110 kPa nos traseiros) e do conteúdo de água no solo (Barbosa et al. 2004; Machado et al. 2005). Com o aumento do tráfego, esse efeito é revertido e a Ds torna a aumentar; o oposto ocorre com a Pt.

Tabela 1. Valores de F, significância e coeficiente de variação das variáveis físicas do solo e de crescimento radicular analisadas, nas diferentes camadas de profundidade, em função da compactação do solo na cultura do girassol. Campo Novo do Parecis, MT, 2014.

Variáveis	Valores de F (CV (%))			
	Camadas de profundidade (m)			
	0,0 – 0,05	0,05 – 0,10	0,10 – 0,15	0,15 – 0,20
Ds	11,46** (8,01) ^a	15,92** (4,47)	14,00** (5,26)	16,86** (4,46)
Pt	11,73** (9,00)	15,98** (5,86)	15,30** (6,86)	17,22** (5,67)
Mac	7,51** (28,34)	18,08** (20,89)	10,89** (26,40)	49,50** (12,91)
Mic	1,18 ^{ns} (19,77)	5,47** (5,32)	1,42 ^{ns} (9,56)	14,27** (6,87)
RSP	4,61** (41,57)	8,77** (37,41)	6,25** (34,87)	5,11** (33,30)
UG	1,26 ^{ns} (6,59)	1,26 ^{ns} (6,59)	0,45 ^{ns} (30,74)	0,45 ^{ns} (30,74)
DR	1,39 ^{ns} (5,54)	3,94** (8,81)	1,06 ^{ns} (12,25)	1,78 ^{ns} (60,05)
AR	9,60** (16,49)	9,87** (34,46)	2,69 ^{ns} (61,39)	0,78 ^{ns} (134,07)
IAR	9,60** (16,49)	9,87** (34,46)	2,69 ^{ns} (61,39)	0,78 ^{ns} (134,07)

**Significativo a $p < 0,01$; *Significativo a $p < 0,05$; ^{ns}Não significativo a $p < 0,05$; ^aValores referentes ao coeficiente de variação em %. Ds = Densidade do solo; Pt = Porosidade total; Mac = Macroporosidade; Mic = Microporosidade; RSP = Resistência do solo à penetração; UG = Umidade gravimétrica; DR = Diâmetro radicular; AR = Área radicular; IAR = Índice de área radicular.

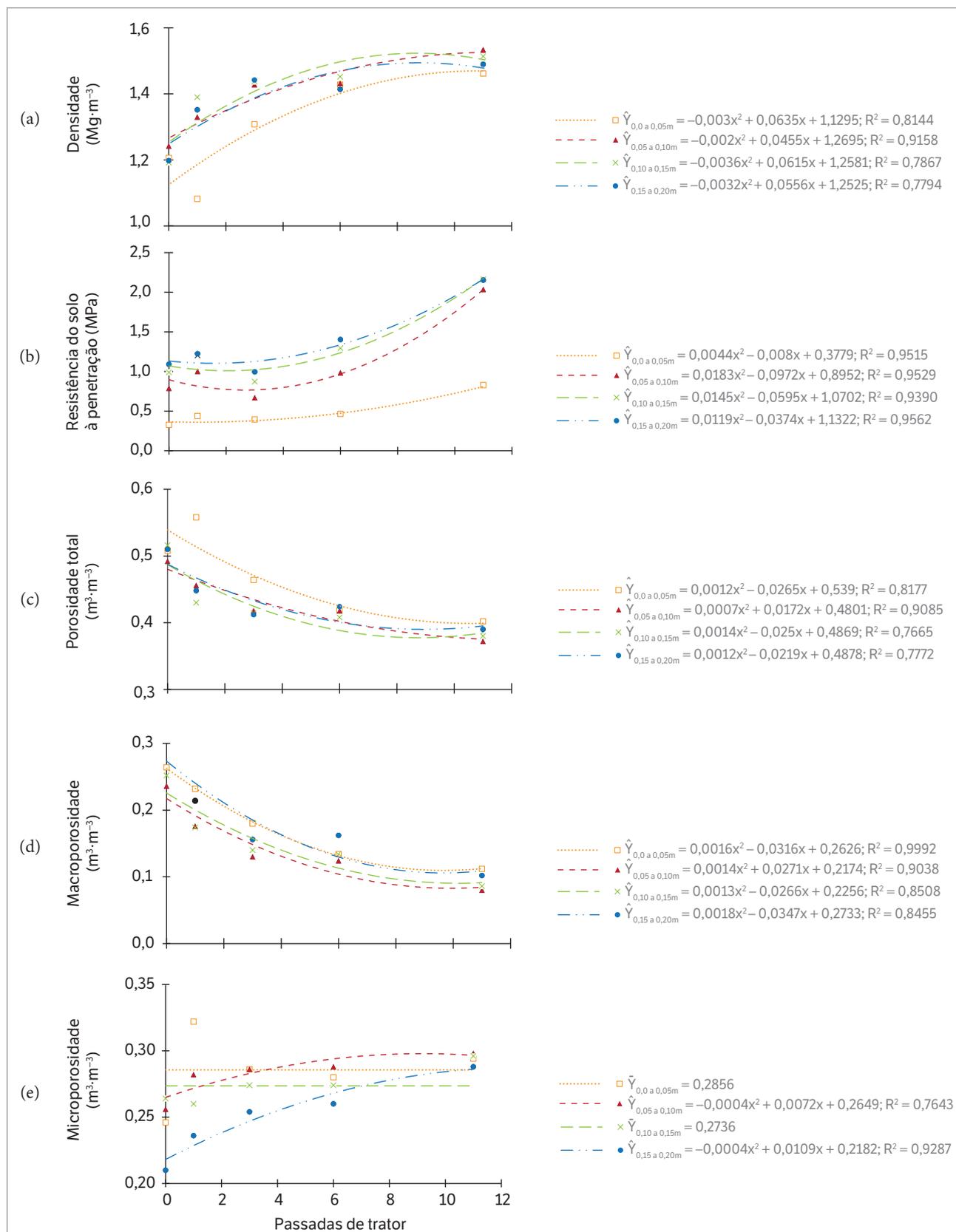


Figura 2. Propriedades físicas do solo nas diferentes camadas de profundidade, em função da compactação do solo na cultura do girassol. Campo Novo do Parecis, MT, 2014.

Houve aumento da Ds na ordem de 21,23; 23,51; 27,01 e 24,37% para as camadas de 0,0 – 0,05; 0,05 – 0,10; 0,10 – 0,15 e 0,15 – 0,20 m, respectivamente, quando se comparou C0 com C11. Os incrementos nos valores de Ds foram decrescentes em função do aumento do tráfego do trator.

Outros trabalhos recentes com compactação encontrados na literatura demonstram um aumento mais expressivo da Ds nas camadas mais superficiais do perfil do solo (Freddi et al. 2007a; Bergamin et al. 2010). Porém, neste trabalho, o aumento da Ds ocorreu em todas as camadas, assim como encontrado por Valadão et al. (2015) no mesmo solo. Provavelmente, isso se deve às características intrínsecas dos solos estudados, como a plasticidade, além das condições de umidade, peso do trator, tipo de pneu e pressão de inflação, sendo que maiores pressões de inflação dos pneus favorecem a compactação subsuperficial (Machado et al. 2005). Atenção especial deve ser dada à camada de 0,15 – 0,20 m, que teve valores de Ds de 1,49 Mg·m⁻³ em C11. Esse valor é 24,37% maior que o observado na mesma camada quando submetida à C0, o que caracteriza compactação subsuperficial.

A RSP aumentou com o tráfego do trator (Figura 2b). A camada de 0,05 – 0,10 m sofreu o maior aumento nos valores de RSP, na ordem de 127,92%, inicialmente de 0,90 MPa em C0 chegando a 2,04 MPa em C11. Valores diferentes foram encontrados por Bergamin et al. (2010) em um Latossolo Vermelho distroférrico, com 64% de argila, onde 6 passadas de trator de 5 Mg resultaram em RSP de 0,93 MPa na camada de 0,05 – 0,10 m, enquanto que, no solo sem compactação adicional, o valor era de 0,63 MPa na mesma camada. Já no trabalho desenvolvido por Freddi et al. (2007b), em um Latossolo Vermelho distrófico típico, com 32% de argila, o tratamento sem tráfego adicional resultou em valores de RSP de 0,83 MPa na camada de 0,02 – 0,05 m, e o submetido a 6 passadas de trator de 11 Mg, em valores de 6,75 MPa na mesma camada.

A amplitude de valores encontrados para a RSP em diferentes trabalhos ocorre, principalmente, devido a textura, mineralogia, tipo de penetrômetro e conteúdo de água no solo no momento de sua determinação. É difícil, portanto, comparar os diferentes tipos de solo apenas com os valores de RSP, porém esse parâmetro reflete características importantes, como o conteúdo de água do solo no monitoramento de áreas irrigadas (Freddi et al. 2007b).

Neste trabalho, observou-se, nas diferentes camadas de profundidade, valores de RSP de 0,33 e 1,09 MPa nas

camadas de 0,0 – 0,05 e 0,15 – 0,20 m, respectivamente, em C0, chegando a 0,83 e 2,15 MPa nas mesmas camadas quando submetidas à C11. Essa diferença em profundidade já era esperada; em geral, os solos apresentam valores de RSP menores em camadas mais superficiais e maiores em profundidade (Freddi et al. 2007b; Bergamin et al. 2010), devido ao maior teor de matéria orgânica em superfície.

As passadas de trator alteraram a Pt, a Mac e a Mic (Figura 2c,d,e). A camada de 0,0 – 0,05 m apresentou as maiores variações de Pt, assim como ocorreu com a Ds, fato justificado pela ação cisalhante do pneu nas primeiras passadas do trator, conforme abordado anteriormente (Barbosa et al. 2004).

Ocorreram reduções da Pt na ordem de 20,87; 24,39; 26,36 e 23,53% para as camadas de 0,0 – 0,05; 0,05 – 0,10; 0,10 – 0,15 e 0,15 – 0,20 m, respectivamente, quando se comparou C0 com C11. Os menores valores de Pt foram de 0,39 m³·m⁻³, em C11, na camada de 0,15 – 0,20 m.

Ao comparar os valores de Mic entre C0 e C11, nota-se aumento de 16,41 e 37,14% nas camadas de 0,05 – 0,10 e 0,15 – 0,20 m, respectivamente; para essas camadas, os valores iniciais eram de 0,26 e 0,21 m³·m⁻³ em C0 e chegaram a 0,30 e 0,29 m³·m⁻³ em C11. Já a Mac sofreu reduções de até 66,45% na camada de 0,15 – 0,20 m, caindo de 0,30 m³·m⁻³ em C0 para 0,10 m³·m⁻³ em C11. Maior atenção deve ser dada à camada de 0,05 – 0,10 m, onde os valores de Mac inicialmente de 0,24 m³·m⁻³ em C0 chegaram a 0,08 m³·m⁻³ em C11, abaixo do nível considerado crítico para o adequado desenvolvimento das raízes por Pagliai et al. (2003). As alterações da Pt estão ligadas de forma direta à Mac, mais especificamente às modificações na estrutura do solo (Pagliai et al. 2003).

Nas condições normais do solo, ou seja, em C0, as características do perfil eram: Ds de 1,21 Mg·m⁻³, Pt de 0,51 m³·m⁻³, Mac de 0,26 m³·m⁻³ e Mic de 0,24 m³·m⁻³ (médias do perfil). Essas características estão próximas das ideais, propostas por Malavolta (2006), em que aproximadamente 50% do solo, em volume, devem ser constituídos por espaços vazios igualmente ocupados por água (microporos) e ar (macroporos). Com o tráfego do trator, a pressão exercida pelo pneu promoveu um rearranjo das partículas sólidas, diminuindo o diâmetro dos poros, obstruindo os espaços vazios entre agregados e transformando os macroporos em microporos. Essa compressão resultou no aumento da Ds e da Mic e na diminuição da Pt e da Mac, chegando aos valores máximos

em C11 de $1,50 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ para Ds, $0,39 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ para Pt, $0,09 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ para Mac e $0,29 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ para Mic (médias do perfil).

A relação macro:micro caiu de 1,08, na ausência de tráfego adicional, para 0,33 no maior nível de compactação, havendo, portanto, mais microporos do que macroporos. Segundo Pagliai et al. (2003), o aumento da compactação pelo tráfego de máquinas reduz a continuidade dos poros (Mac relacionada à estrutura), o que diminui a condutividade hidráulica dos solos. Nessas condições de percolação mais lenta, a erosão laminar é facilitada, o que pode culminar em sério problema ambiental; além disso, pode haver maior retenção da água em superfície, o que pode prejudicar a oxigenação das raízes (Evert 2006).

O IAR foi alterado pela compactação adicional entre 0,0 e 0,10 m de profundidade (Figura 3a). Mesmo nas condições de solo descompactado, 93% das raízes concentraram-se nos primeiros 0,10 m de solo. Menos de 2% das raízes encontravam-se na camada de 0,15 – 0,20m. Em outros trabalhos, encontram-se respostas diferenciadas entre as espécies cultivadas. Bergamin et al. (2010), trabalhando com milho, verificaram que havia distribuição das raízes em solo descompactado de 75,93% da superfície radicular na camada de 0,0 – 0,10 m e 9,12% na camada de 0,15 – 0,20 m. Já Valadão et al. (2015) encontraram valores de 76,86 e

53,73% da AR na camada de 0,0 – 0,10 m, para soja e milho, respectivamente, enquanto que, na camada de 0,15 – 0,30 m, os valores foram de 7,46 e 26,84% para as mesmas culturas.

Com essa abordagem, pode-se inferir que a planta de girassol apresenta baixa eficiência de exploração do solo em profundidade, fazendo com que as características físicas do solo, adequadas ao longo do perfil, tornem-se ainda mais importantes para o adequado crescimento radicular dessa cultura.

Apesar de o girassol ser caracterizado como resistente à seca por Castro et al. (1996), a baixa eficiência das raízes em explorar a subsuperfície (entenda-se como subsuperfície a camada abaixo de 0,0 – 0,10 m) prejudica a absorção da água pela cultura, bem como a ciclagem de nutrientes e a eficiência da adubação, principalmente no caso de elementos móveis, facilmente lixiviados.

O diâmetro radicular do girassol foi afetado pelo tráfego do trator apenas na camada de 0,05 – 0,10 m (Figura 3b). Houve aumento de 20,25% no calibre das raízes ao se comparar C0 com C11. Esse aspecto está diretamente relacionado ao tipo de sistema radicular do girassol, pois raízes de dicotiledôneas apresentam maiores diâmetros de raiz e também são mais eficientes em penetrar solos compactados (Materechera et al. 1991). Segundo os mesmos autores, o que ocorre é uma

→

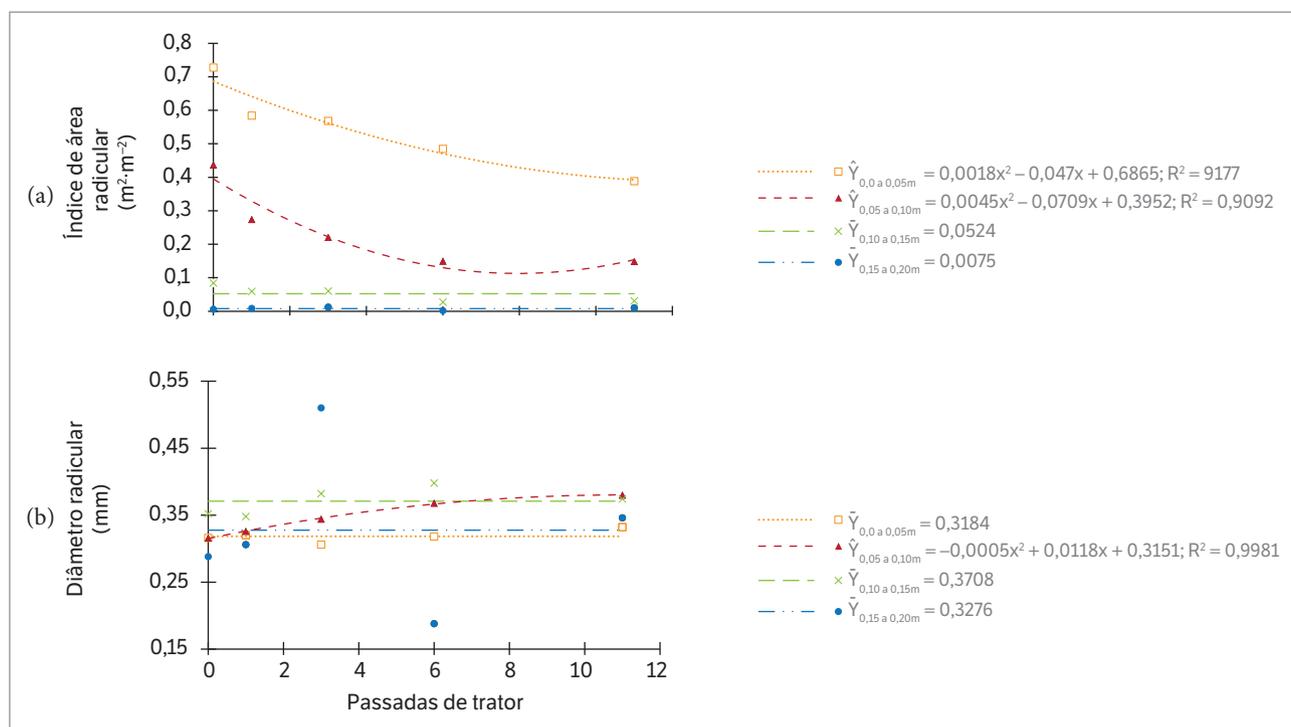


Figura 3. (a) Índice de área radicular e (b) Diâmetro radicular em função da compactação do solo na cultura do girassol. Campo Novo do Parecis, MT, 2014.

proporcionalidade entre a diminuição da alongação das raízes e o aumento no diâmetro destas.

Além disso, deve-se considerar que há uma maior produção de etileno em raízes sob hipóxia (Geisler-Lee et al. 2010), condição de falta de oxigênio que pode ocorrer em solos compactados, sendo esse hormônio associado à inibição do alongamento e indução de um inchaço das raízes (Bertell e Eliasson 1992). Essa segunda opção é plausível e pode inclusive ser mais atuante que a primeira, pois outros resultados neste trabalho reforçam essa hipótese.

Em comparação com o solo não trafegado, a máxima compactação promoveu diminuição no IAR na ordem de 46,60 e 66,01% para as camadas de 0,0 – 0,05 e 0,05 – 0,10 m, respectivamente. De maneira geral, houve diminuição de 54% no IAR do perfil comparando-se os 2 tratamentos extremos (C0 e C11).

Com base nos resultados de Bergamin et al. (2010), Valadão et al. (2015) e nos obtidos neste trabalho, fica clara a dependência da Mac para o adequado desenvolvimento das raízes das plantas. Iijima e Kato (2007) confirmam isso em seu estudo, onde a anaerobiose reduziu a alongação das raízes, mesmo não apresentando alteração do crescimento em expansão radial. Provavelmente, o diâmetro das raízes seja alterado pela produção de etileno em função da deficiência de oxigenação, o que corrobora a formação de aerênquimas nas raízes, como será abordado a seguir, uma vez que esse hormônio também está envolvido nesse processo (Geisler-Lee et al. 2010).

Na Figura 4, observa-se a diferença na distribuição das raízes do girassol no perfil do solo, até 0,20 m, em função do tráfego adicional do trator.

As alterações físicas do solo provocadas pelo tráfego do trator resultaram em alterações anatômicas nas raízes que podem ser visualizadas na Figura 5. Pode-se constatar que as raízes coletadas estavam em início de desenvolvimento secundário, já que as raízes primárias de girassol apresentam distribuição tetrarca, com 4 vasos de xilema e 4 vasos de floema, como descrito por Gostin (2009), a qual não é observada. Nessas raízes, os vasos estão distribuídos com os protoxilemas e metaxilemas no centro (cor violeta), e o câmbio vascular está deslocado para a periferia do cilindro central, entre o xilema e o parênquima (Figura 5a). Porém, o crescimento secundário não é pleno, pois ainda há presença de parênquima, o qual desapareceria com a formação do súber e da feloderme (Evert 2006).

Também é possível observar, nas lâminas das raízes oriundas de C11, que as células vestigiais do câmbio vascular e parênquima apresentam um formato achatado (Figura 5e,g). Trata-se de um indicio de que há dificuldade de crescimento radial das raízes, provavelmente devido à maior Ds e RSP nesse tratamento; o mesmo não foi observado quando foram analisadas as lâminas de C0.

Observando os cortes transversais das raízes submetidas a C0 e C11, pode-se verificar a alteração do formato das células centrais do xilema, mais arredondadas no solo não trafegado e mais angulosas no solo compactado (Figura 5b,e). Isso pode ser reflexo da impedância mecânica provocada pela maior Ds, que restringe o crescimento radial das células e acaba por deformá-las.

Mesmo não sendo objetivo do estudo, algumas lâminas apresentaram raízes secundárias (Figura 5c,f) e pode-se notar

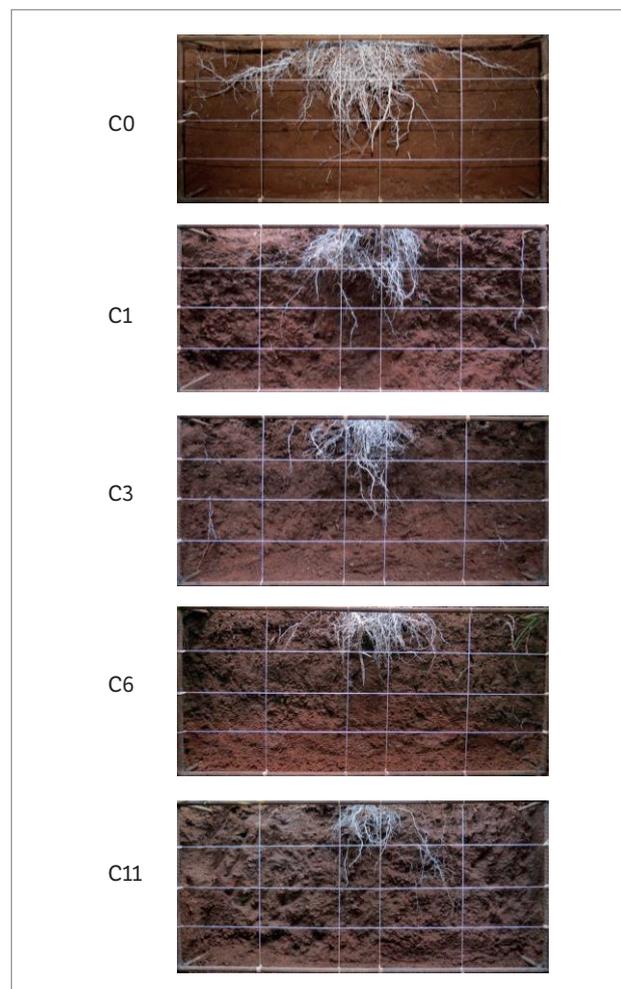


Figura 4. Distribuição do sistema radicular do girassol em 5 níveis de compactação: 0 (C0); 1 (C1); 3 (C3); 6 (C6) e 11 (C11) passadas de trator. Campo Novo do Parecis, MT, 2014.

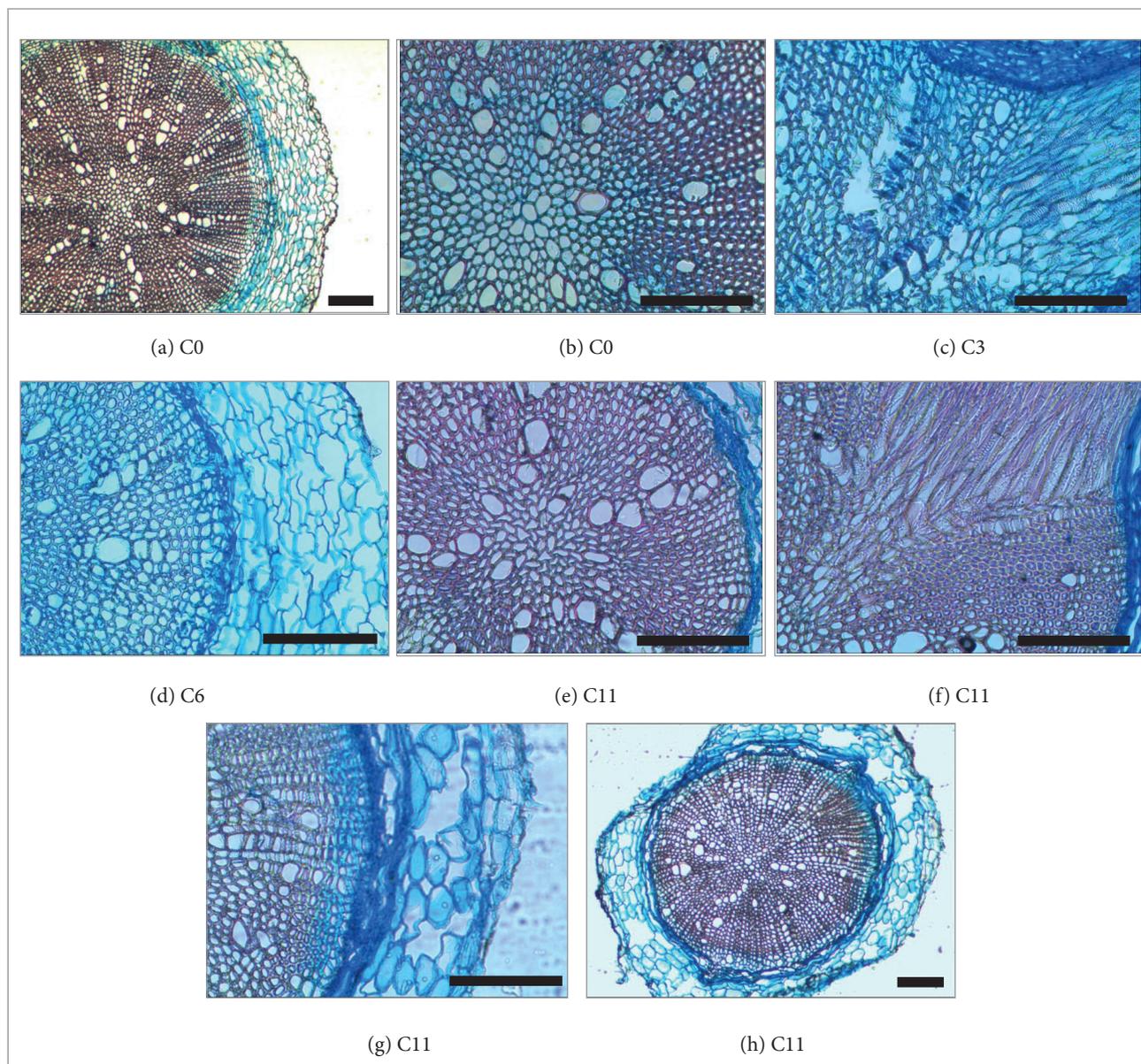


Figura 5. Seções transversais de raízes de girassol submetidas a 0 (a, b); 3 (c); 6 (d) e 11 (e, f, g, h,) passadas de trator, evidenciando as principais alterações anatômicas. Campo Novo do Parecis, MT, 2014. A barra corresponde a 200 μm.

a diferença de calibre entre os feixes vasculares das raízes submetidas à C3, que apresentam elementos de vaso mais largos e em menor número do que as submetidas à C11, em que os feixes vasculares são mais delgados e numerosos. Isso é um indício de que a compactação restringe a absorção de água e, como alteração adaptativa, há uma maior formação de vasos (Evert 2006).

As modificações estruturais do solo proporcionaram maior D_s , menor espaço poroso (Pt), menor capacidade de oxigenação (< Mac) e maior capacidade de retenção de água (> Mic), culminando na formação de parênquima aerífero

(aerênquima), em C6 e C11, típico em raízes submetidas a hipóxia (Figura 5d,g,h). Nos cortes transversais das raízes submetidas à C6, pode-se observar a degradação das paredes celulares de algumas células parenquimáticas, formando pequenos espaços vazios, denominados espaços livres aparentes (ELA) ou comumente chamados de aerênquimas, os quais são maiores e mais nítidos ao se observarem as lâminas das raízes submetidas à C11. Considerando que a média da Mac do perfil é de 0,14 e 0,09 $m^3 \cdot m^{-3}$, em C6 e C11, respectivamente, pode-se estabelecer o primeiro valor como limite para a adequada oxigenação das raízes de girassol. O valor de Mac de 0,09 $m^3 \cdot m^{-3}$

→

em C11, onde os aerênquimas são nítidos, está de acordo com o limite proposto por Pagliai et al. (2003) de $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ para a adequada oxigenação das raízes; porém, nesse nível, as alterações anatômicas já estão estabelecidas e, conseqüentemente, há perda por estresse respiratório.

Mostajeran e Rahimi-Eichi (2008) destacam que a formação de aerênquimas tem como vantagem o aumento da oxigenação, mas compromete a resistência mecânica das raízes, podendo enfraquecer a estrutura da raiz. Os autores ainda explicam que, com a pressão externa provocada pela compactação, a estrutura dos aerênquimas pode entrar em colapso, e a quantidade de tecido funcional pode ser reduzida.

O resumo da significância das variáveis vegetativas e produtivas analisadas encontra-se na Tabela 2. A compactação do solo provocou redução das características vegetativas (AP, PP, DH e AC), exceto para produção de MS, DC e MC. Houve também redução da PR e da ME.

As alterações provocadas pela compactação do solo promoveram reflexos no desenvolvimento vegetativo da cultura, diminuindo a altura das plantas, a altura dos capítulos e o diâmetro do colmo (Figura 6a). Apesar de o acúmulo de matéria seca não ter sido alterado com a compactação (Tabela 2), as plantas apresentaram menor porte e menor diâmetro do

colmo; isso provavelmente se deve à menor absorção de água, uma vez que esta é responsável pela turgidez e expansão das células (Evert 2006). A massa da matéria seca provavelmente não foi afetada devido ao efeito de diluição ou concentração de carboidratos e fotoassimilados. Como a altura das plantas diminuiu, houve também redução na altura do capítulo, o que pode prejudicar a colheita dos grãos.

Tabela 2. Valores de F, significância e coeficiente de variação das variáveis vegetativas e produtivas analisadas, em função da compactação do solo na cultura do girassol. Campo Novo do Parecis, MT, 2014.

Variáveis	Valores de F	CV (%)
Altura de planta	8,12**	4,89
População de plantas	6,38**	12,83
Diâmetro da haste	7,77**	6,03
Altura do capítulo	14,01**	3,09
Produção de massa seca	1,31 ^{ns}	14,40
Diâmetro do capítulo	0,47 ^{ns}	5,07
Massa do capítulo	1,35 ^{ns}	18,07
Massa de 100 aquênios	4,34*	12,37
Produtividade de aquênios por hectare	4,34*	26,76

**Significativo a $p < 0,01$; *Significativo a $p < 0,05$; ^{ns}Não significativo a $p < 0,05$.

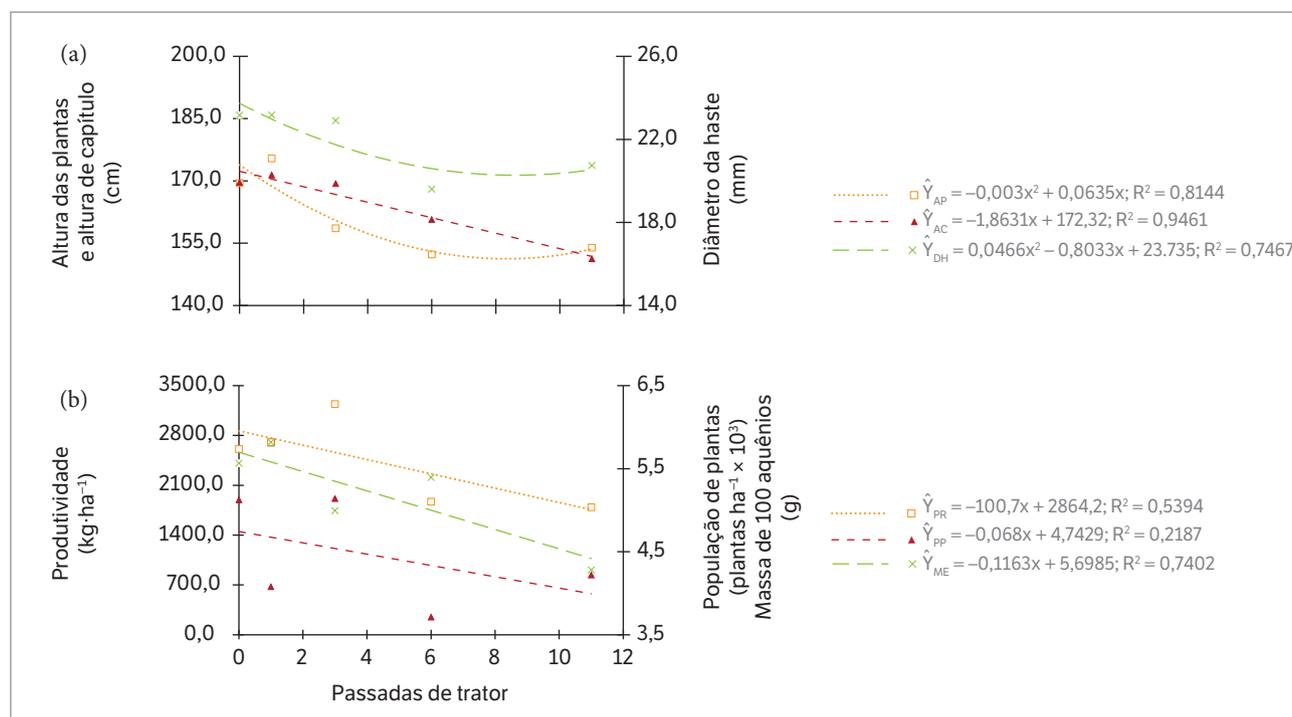


Figura 6. (a) Altura de plantas (AP), altura de capítulo (AC) e diâmetro da haste (DH) e (b) Produtividade (PR), massa de 100 aquênios (ME) e população de plantas (PP) em função da compactação do solo na cultura do girassol. Campo Novo do Parecis, MT, 2014.

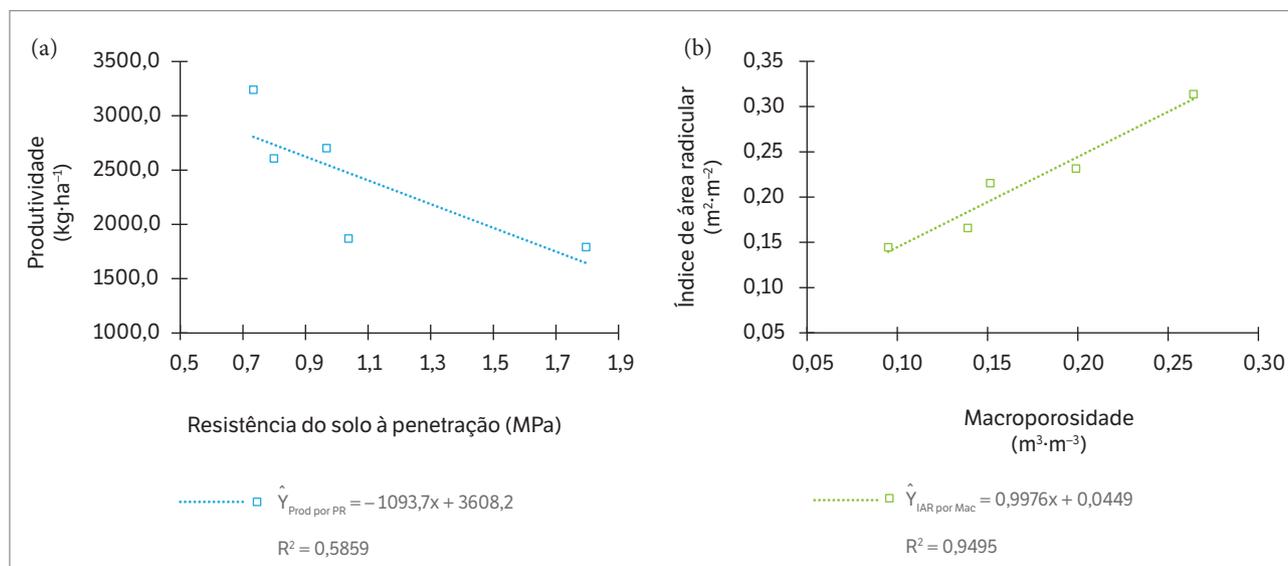


Figura 7. (a) Relações entre produtividade (PR) versus resistência do solo à penetração (RSP) e (b) Índice de área radicular (IAR) versus macroporosidade (Mac) na cultura do girassol. Camada de 0,0 – 0,20 m (n = 25). Campo Novo do Parecis, MT, 2014.

Comparando-se C0 e C11, verifica-se redução de 9,20; 10,87 e 10,42% na altura de plantas, altura do capítulo e diâmetro do caule, respectivamente. Para as variáveis reprodutivas da cultura, houve redução na ordem de 31,30; 23,08 e 17,65% para PR, ME e PP, respectivamente (Figura 6b), quando se comparou C0 com C11.

O efeito da compactação sobre a produtividade é, em parte, devido à redução na PP da cultura, reflexo do não estabelecimento das plântulas por causa das condições inadequadas do solo. Porém, a redução da PP foi da ordem de 17,65%, enquanto que a redução da PR da cultura foi de 31,30%, evidenciando que não foi apenas a PP que diminuiu a PR, mas provavelmente houve menor redistribuição dos fotoassimilados para os aquênios. Isso resultou em grãos mais leves (redução de 23,08% no peso dos aquênios) e, conseqüentemente, menor produtividade.

Mais uma vez, os resultados evidenciam que houve menor absorção de água, pois esta é responsável pelo transporte de carboidratos através dos vasos do floema durante o enchimento dos grãos no estágio reprodutivo da cultura (Evert 2006). Essa menor absorção de água está ligada ao volume de solo explorado pelo sistema radicular da planta; além disso, é um reflexo do aumento do potencial matricial do solo, decorrente dos maiores valores de Mic, o que pode resultar em uma maior retenção de água, nem sempre disponível para absorção.

Houve correlação entre RSP e PR, $-0,5126$ (negativa), e entre Mac e IAR, $0,8289$ (positiva), ambas significativas a $p < 0,01$ (Figura 7a,b).

A RSP é a característica que melhor reflete a produtividade. Outros trabalhos também apresentam relação direta entre a RSP e a PR das culturas. No trabalho desenvolvido por Freddi et al. (2007a), houve redução na produtividade de milho a partir de 1,65 MPa. Já no trabalho de Beutler e Centurion (2004), houve decréscimo na produtividade de soja a partir de 0,84 MPa. Neste trabalho, a redução na PR do girassol ocorreu a partir de 0,733 MPa. Como se trata de culturas diferentes, é difícil comparar os valores de RSP, mas pode-se afirmar que o aumento da RSP promove redução na produtividade do girassol.

A Mac foi a que melhor se correlacionou com o desenvolvimento das raízes medido pelo IAR. Esses resultados corroboram os obtidos por Bergamin et al. (2010), que obtiveram correlação linear positiva entre Mac e comprimento radicular do milho. Pode-se afirmar, portanto, que a redução da aeração pode prejudicar o desenvolvimento das raízes de girassol, limitando o volume de solo explorado.

O fator “a” da equação de regressão entre Mac e IAR é de $0,9976\text{ m}^2\cdot\text{m}^{-2}$; esse fator determina a inclinação da reta e quanto o fator determinante influencia o dependente. Ou seja, quando ocorrem pequenas alterações na Mac, estas resultam em grandes reduções no desenvolvimento das

raízes e, conseqüentemente, prejudicam o desenvolvimento da cultura.

CONCLUSÃO

A compactação do solo provocada pelo tráfego de máquinas promove diminuição do índice de área radicular do girassol. Além disso, limita a exploração do perfil do solo e provoca alterações anatômicas nas raízes, o que diminui o desenvolvimento e a produtividade da cultura do girassol.

Valores maiores que 0,733 MPa de resistência do solo à penetração promovem redução na produtividade do girassol,

sendo considerados críticos para a cultura. Já os valores menores que $0,264 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ de macroporosidade do solo promovem redução do índice de área radicular do girassol, sendo considerados críticos para a cultura.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT) pelo financiamento parcial e viabilização deste trabalho. Ao Departamento de Biologia da Universidade Federal de Lavras, em especial ao setor de Botânica Estrutural, que cedeu os equipamentos necessários para a realização dos cortes anatômicos.

REFERÊNCIAS

- Barbosa, J. A., Dias Junior, M. S., Vieira, L. B. e Dias, G. P. (2004). Resistência ao cisalhamento de um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido ao tráfego de um trator agrícola. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 8, 321-325. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662004000200024>.
- Bergamin, A. C., Vitorino, A. C. T., Franchini, J. C., Souza, C. M. A. e Souza, F. R. (2010). Compactação de um Latossolo Vermelho distroférrico e suas relações com o crescimento radicular do milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34, 681-691. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000300009>.
- Bertell, G. e Eliasson, L. (1992). Cytokinin effects on root growth and possible interactions with ethylene and indole 3 acetic acid. *Physiologia Plantarum*, 84, 255-261. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1399-3054.1992.tb04662.x>.
- Beutler, A. N. e Centurion, J. F. (2004). Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 39, 581-588. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2004000600010>.
- Bianchini, A., Maia, J. C. S., Guimarães, P. S. G., Capelli, N. e Umezu, C. K. (2002). Penetrógrafo eletrônico automático. *Engenharia Agrícola e Ambiental*, 6, 332-336. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662002000200024>.
- Castro, C., Castiglioni, V. B. R. e Balla, A. (1996). A cultura do girassol: tecnologia de produção. Documentos n. 67. Londrina: Embrapa-CNPSo.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2011). Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa em Solos.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2013). Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
- Evert, R. F. (2006). *Esau's Plant anatomy: meristems, cells, and tissues of the plant body: their structure, function, and development*. New York: John Wiley & Sons.
- Ferreira, D. F. (2011). Sisvar: sistema de análise de variância para dados balanceados. Lavras: DEX/UFLA.
- Ferreira, J. C. V. (2001). Mato Grosso e seus municípios. Cuiabá: Secretaria de Estado e Educação, Editora Burity.
- Freddi, O. S., Centurion, J. F., Beutler, A. N., Aratani, R. G. e Leonel, C. L. (2007a). Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31, 627-636. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000400003>.
- Freddi, O. S., Centurion, J. F., Beutler, A. N., Aratani, R. G., Leonel, C. L. e Silva, A. P. (2007b). Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento e na produtividade da cultura do milho. *Bragantia*, 66, 477-486. <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052007000300015>.

- Geisler-Lee, J., Caldwell, C. e Gallie, D. R. (2010). Expression of the ethylene biosynthetic machinery in maize roots is regulated in response to hypoxia. *Journal of Experimental Botany*, 61, 857-871. <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/erp362>.
- Gostin, I. (2009). Morphogenetical aspects in *Helianthus annuus* L. during the ontogenesis. *Luçrări Ştiinţifice - Seria Agronomie*, 52, 181-186.
- Iijima, M. e Kato, J. (2007). Combined soil physical stress of soil drying, anaerobiosis and mechanical impedance to seedling root growth of four crop species. *Plant Production Science*, 10, 451-459. <http://dx.doi.org/10.1626/pps.10.451>.
- Johansen, D. A. (1940). *Plant microtechnique*. 2. ed. New York: Mc-Graw-Hill.
- Jorge, L. A. C. e Silva, D. J. C. (2010). SAFIRA: Sistema de Análise de Fibras e Raízes. São Carlos: EMBRAPA.
- Klein, V. A. e Boller, W. (1995). Avaliação de diferentes manejos de solo e métodos de semeadura em área sob sistema de plantio direto. *Ciência Rural*, 25, 395-398. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84781995000300011>.
- Kraus, J. E. e Arduin, M. (1997). *Manual básico de métodos em morfologia vegetal*. Seropédica: Editora da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
- Machado, A. L. T., Reis, A. V., Ferreira, M. F. P., Machado, R. L. T., Machado, A. L. C. e Bauer, G. B. (2005). Influência da pressão de inflação do pneu do trator na resistência do solo à penetração. *Revista Brasileira de Agrociência*, 11, 481-486. <http://dx.doi.org/10.18539/cast.v11i4.1275>.
- Malavolta, E. (2006). *Manual de nutrição mineral de plantas*. São Paulo: Editora Agronômica Ceres.
- Materechera, S. A., Dexter, A. R. e Alston, A. M. (1991). Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant species. *Plant and Soil*, 135, 31-41. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00014776>.
- Mostajeran, A. e Rahimi-Eichi, V. (2008). Drought stress effects on root anatomical characteristics of rice cultivars (*Oryza sativa* L.). *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 11, 2173-2183.
- Pagliai, M., Marsili, A., Servadio, P., Vignozzi, N. e Pellegrini, S. (2003). Changes in some physical properties of a clay soil in Central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. *Soil and Tillage Research*, 73, 119-129. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00105-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00105-3).
- Poletine, J. P., Mendes, M. A., Sapia, J. G. e Maciel, C. D. G. (2013). Avaliações morfoagronômicas e teor de óleo em genótipos de girassol nas condições do Arenito Caiuá. *Journal of Agronomic Sciences*, 2, 105-117.
- Taylor, H. M., Roberson, G. M. e Parker Junior, J. J. (1966). Soil strength-root penetration relations for medium to coarse-textured soil materials. *Soil Science*, 102, 18-22. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-196607000-00002>.
- Valadão, F. C. A., Weber, O. L. S., Valadão Júnior, D. D., Scapinelli, A., Deina, F. R. e Bianchini, A. (2015). Adubação fosfatada e compactação do solo: sistema radicular da soja e do milho e atributos físicos do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39, 243-255. <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbcS20150144>.