

Estratégias de manejo para melhoria da camada de enraizamento profunda de um Latossolo

Management strategies to deep rooting layer improvement of an Oxisol

Marceli Piccin^{1,*}, Telmo J. C. Amado¹ e Jackson E. Fiorin²

¹Departamento de Solos – Universidade Federal de Santa Maria, Avenida Roraima, 1000, CEP 97105-900, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil

²Cooperativa Central Gaúcha Ltda (CCGL-Tec), RS 342, CEP 98005-970, Cruz Alta, Rio Grande do Sul, Brasil

(*E-mail: marcelipiccin@hotmail.com)

<https://doi.org/10.19084/rca.19242>

Recebido/received: 2020.01.16

Aceite/accepted: 2020.04.22

RESUMO

A longa duração do sistema plantio direto tem causado limitações para o solo, como a compactação e a acidez subsuperficiais. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos de estratégias de manejo sobre os atributos do solo e a produtividade da soja. O experimento foi realizado em um Latossolo nas safras agrícolas de 2016/17 e 2017/18 e seu delineamento experimental foi de blocos ao acaso com três repetições. Os tratamentos foram constituídos pela aplicação de estratégias de descompactação (escarificação e subsolagem) e de melhoria química (óxido de cálcio e magnésio, calcário e gesso), utilizadas de forma isolada e combinada. As amostragens de solo para análise química e a determinação da resistência à penetração do solo foram realizadas 6 e 18 meses após a aplicação dos tratamentos. A escarificação e a subsolagem foram eficientes na redução da resistência à penetração, mas apresentaram efeito temporário no solo. A subsolagem intensa associada à aplicação profunda de óxido de cálcio e magnésio, após 18 meses da aplicação, incrementou os valores de pH e os teores de cálcio e magnésio, além de neutralizar a saturação por alumínio até 60 cm. Em ambas as safras avaliadas, não houve efeito significativo dos tratamentos sobre a produtividade da soja.

Palavras-chave: Sistema plantio direto, resistência à penetração, acidez subsuperficial

ABSTRACT

The long term use of the no-tillage system has caused limitations to the soil, such as the subsurface compaction and acidity. The aim of this study was to evaluate the effect of management strategies on soil attributes and soybean yield. The experiment was carried out in the 2016/17 and 2017/18 crop seasons and its experimental design was a randomized blocks with three replications. The treatments were constituted by strategies of physical improvement (chiseling and subsoiling) and chemical improvement (calcium and magnesium oxide, limestone and gypsum), isolated or combined. Soil samplings for chemical analysis and determination of resistance to soil penetration were performed 6 and 18 months after application of treatments. The chiseling and subsoiling were efficient in reduction compaction, but presented temporary effects in the soil. The intense subsoiling associated with the deep application of calcium and magnesium oxide, 18 months after the application, increased the pH values and the calcium and magnesium contents in addition to neutralizing the aluminum saturation to the depth of 60 cm. In both evaluated seasons, there was no significant effect of treatments on soybean productivity.

Keywords: No-tillage system, penetration resistance, subsurface acidity

INTRODUÇÃO

No mundo, mais de 150 milhões de hectares de solo são cultivados sob sistema plantio direto (SPD) (Kassam *et al.*, 2015). No Brasil, este sistema começou a ser implantado na década de 70 com o objetivo de evitar a erosão do solo e é baseado em três premissas básicas: ausência de revolvimento do solo, manutenção de cobertura do solo durante todo o ano e rotação de culturas (Hobbs *et al.*, 2008). De acordo com Soratto e Crusciol (2008), o SPD é uma das melhores alternativas para o manejo sustentável dos recursos naturais na exploração agrícola dos solos tropicais e subtropicais, além de ser uma estratégia que auxilia na redução das perdas de água e solo pela erosão, devido à manutenção de cobertura sobre o solo (Schick *et al.*, 2014).

No entanto, a aplicação superficial de fertilizantes e corretivos associada à ausência de preparo do solo expõe o solo à compactação, acidez e toxidez de alumínio em subsuperfície, limitações que podem afetar o crescimento e desenvolvimento radicular das plantas (Dalla Nora e Amado, 2013). É comum os Latossolos tropicais, sobretudo os argilosos, apresentarem uma transição abrupta de qualidade química (Amado *et al.*, 2009) e física (Reichert *et al.*, 2009a) ao longo do seu perfil, apresentando uma camada superficial (geralmente de 0 a 7 cm) com elevada concentração de nutrientes e pH mais elevado associados à menor densidade do solo e, abaixo dela, uma camada subsuperficial (geralmente de 7 a 20 cm), com elevada saturação por alumínio, baixa concentração de nutrientes, pH baixo e com problemas de compactação.

A acidez e a toxidez por alumínio dos Latossolos se explica principalmente à correção de pH do solo, que no SPD é feita através da aplicação superficial de calcário. Este corretivo atua no solo em camadas superficiais, até no máximo 10 cm, o que ocorre devido à baixa solubilidade do calcário e às reduzidas doses aplicadas. Desta forma, os efeitos benéficos da calagem, como a elevação do pH, dos teores de Ca e Mg e neutralização do Al^{+3} normalmente se restringem às zonas de aplicação ou imediatamente abaixo delas (Pöttker e Ben, 1998).

Segundo Beulter e Centurion (2004), a compactação afeta a distribuição das raízes das plantas no solo, pois altera a estrutura do mesmo, principalmente

devido à redução da porosidade, principalmente da macroporosidade, o que afeta a disponibilidade de água no solo.

A resistência mecânica à penetração do solo (RP) pode representar a condição de compactação do solo e a sua influência no enraizamento das plantas (Bengough *et al.*, 2011), pois está relacionada à coesão do solo e pode servir como indicador para apoiar a decisão de realizar ou não a escarificação mecânica (Drescher *et al.*, 2016). No entanto, Whitley *et al.* (1981) relatam que a pressão exercida pela haste do penetrômetro pode ser diferente da realmente exercida pelas raízes das plantas, sobretudo em solos não mobilizados, os quais frequentemente possuem canais preferenciais, de origem biológica, que podem ser utilizados pelas raízes durante o crescimento e que apresentam resistência reduzida.

Os valores críticos de RP ao crescimento radicular podem sofrer variações de acordo com o tipo de solo, umidade, teor de matéria orgânica do solo (MOS), com a cultura e, até mesmo entre as cultivares. Como padrão, Taylor *et al.* (1966) definiram que valores de RP acima de 2,0 MPa são limitantes ao crescimento das raízes e desenvolvimento da parte aérea da maioria das culturas de interesse agrícola.

A soma dos efeitos da compactação, acidez e toxidez de Al^{+3} do solo subsuperficial podem potencializar os danos causados por situações de déficit hídrico, comuns no Rio Grande do Sul. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar se a aplicação profunda de óxido de Ca e Mg associada à descompactação é eficiente para a melhoria dos atributos físicos e químicos da camada de enraizamento profunda de um Latossolo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado próximo da cidade de Dois Irmãos das Missões no sul do Brasil (27° 67' S 53° 56' O e 525 m de altitude) em um Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa (EMBRAPA, 2018) ou Rhodic Ferralsol (IUSS Working Group WRB, 2014). O clima da região é classificado como Subtropical Úmido (Cfa) (Köppen, 1938) e a precipitação pluvial durante o período experimental pode ser observada na Figura 1.

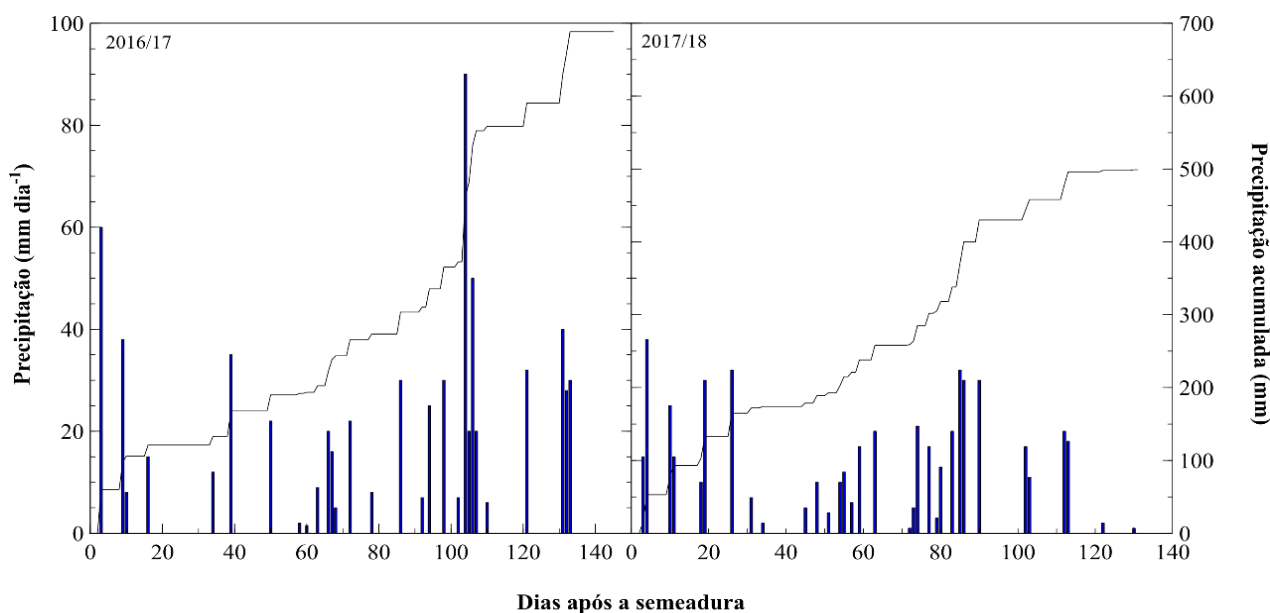


Figura 1 - Precipitação pluvial diária e acumulada durante o período experimental.

Anteriormente à implantação do experimento, a área foi manejada sob sistema plantio direto por aproximadamente 20 anos. No verão, a área era cultivada com soja (*Glycine max* L.) e no inverno com a cobertura de aveia (*Avena strigosa* L.), azevém (*Lolium multiflorum* L.) e nabo-forrageiro (*Raphanus raphanistrum* L.). O experimento foi implantado em outubro de 2016, anteriormente à semeadura da soja (cultivar NS5909) e os atributos químicos e físicos do solo no momento da implantação estão descritos no Quadro 1.

Como ferramentas de melhoria da qualidade química do solo foram utilizados o óxido de Ca e Mg (ou cal virgem), calcário e a associação de gesso e calcário. O óxido de Ca e Mg possuía poder

relativo de neutralização total (PRNT) de 183% e sua concentração de CaO e MgO é de 60% e 30%, respectivamente. O calcário utilizado neste trabalho foi o magnesiano, o qual possuía concentrações de CaO e MgO de 25% e 10%, respectivamente e PRNT de 71%. O gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) utilizado possuía concentração de Ca de 15% (150 g kg^{-1} de Ca^{2+}) e de S de 11% (110 g kg^{-1} de S-S).

Para atenuar os efeitos da elevada resistência à penetração da subsuperfície do solo, foram utilizadas duas ferramentas: a escarificação e a subsolagem. A escarificação (até 30 cm) foi realizada utilizando um escarificador da marca Jan®, modelo Matic, o qual consistia de hastas escarificadoras com espaçamento de 50 cm entre elas. A subsolagem (até 50 cm)

Quadro 1 - Caracterização química e física da área experimental anteriormente à aplicação dos tratamentos

Prof. cm	pH H ₂ O	H+Al -- cmol _c dm ⁻³ --	Al	CTC	M.O.	Sat. Ca ----- % -----	Sat. Mg ----- % -----	V	m	S - mg dm ⁻³	P	RP KPa
0-10	5,2	5,1	0,2	11,7	3,8	40,8	10,6	56,1	3,6	10,9	14,1	1123
10-20	5,1	5,6	0,5	10,3	2,7	33,7	8,9	45,5	9,8	16,9	3,7	2974
20-40	5,2	5,3	0,5	9,2	2,4	31,1	9,6	43,0	12,1	13,6	2,0	2364
40-60	5,1	5,6	0,7	8,9	1,9	27,0	9,0	37,1	17,9	16,0	1,6	1763
60-80	5,2	5,2	0,6	8,0	1,5	24,9	9,6	35,1	17,6	11,6	1,4	-
80-100	5,2	5,1	0,7	7,4	1,2	21,4	8,5	30,4	22,2	11,7	1,6	-

Prof. – Profundidade; H+Al – Acidez potencial; Al – Alumínio; CTC – Capacidade de troca de cátions; M.O. – Matéria orgânica; Sat. Ca – Saturação por cálcio; Sat. Mg – Saturação por magnésio; V – Saturação por bases; m – Saturação por Al; S – Enxofre; P – Fósforo; RP – Resistência à penetração do solo.

foi realizada através da utilização de um implemento chamado de adubador de perfil da marca Kamaq®, que possuía distância entre hastes de 70 cm. As hastes de ambos os implementos são do tipo reta-inclinada.

O subsolador utilizado possuía uma caixa armazenadora acoplada e desta forma foi possível realizar a aplicação profunda de corretivos que, por questões operacionais, foi o óxido de Ca e Mg. A aplicação era feita através de aberturas localizadas nas hastes do implemento que aplicava o corretivo no solo, simultaneamente à descompactação, através da ação da gravidade em três profundidades no solo (10, 30 e 50 cm).

O delineamento utilizado foi de blocos ao acaso com três repetições, e os tratamentos utilizados foram: Test. – Testemunha; T1 – Subsolação com espaçamento de 70 cm; T2 – Escarificação com espaçamento de 50 cm; T3 – Subsolação com espaçamento de 70 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha⁻¹) com espaçamento de 70 cm; T4 – Escarificação com espaçamento de 50 cm + aplicação superficial de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha⁻¹); T5 – Aplicação superficial de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha⁻¹); T6 – Aplicação de calcário (3,0 Mg ha⁻¹) + gesso (3,0 Mg ha⁻¹) em superfície; T7 – Aplicação de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha⁻¹) + calcário (3,0 Mg ha⁻¹) + gesso (3,0 Mg ha⁻¹) em superfície; T8 – Subsolação com espaçamento de 35 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg (1,2 Mg ha⁻¹) com espaçamento de 70 cm.

A aplicação do T8 foi realizada através de duas passadas intercaladas do subsolador. No entanto, a aplicação de corretivo foi realizada apenas em uma das passadas do implemento, fazendo que o espaçamento da subsolação fosse de 35 cm e o da aplicação de corretivo fosse de 70 cm.

Foram realizadas duas coletas de solo (6 e 18 meses após a aplicação) através da abertura de trincheiras no solo de 0,3 x 0,3 x 1 m com o uso de um perfurador de solo. As profundidades de coleta foram: 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60. A análise completa do solo foi realizada no laboratório pertencente à CCGL (Cooperativa Central Gaúcha Ltda) em Cruz Alta e seguiu a metodologia proposta por Tedesco *et al.* (1995).

A avaliação da resistência à penetração do solo (RP) foi realizada nos mesmos momentos das coletas de solo através do uso de um penetrômetro automático (SoloTrack PLG5300 da marca Falker®). As leituras foram realizadas a cada centímetro até 60 cm de profundidade através de uma célula de carga e inserção da haste a uma velocidade de 0,024 m s⁻¹. Como o solo era argiloso, a ponteira utilizada foi do tipo cone 2 (de diâmetro 12,83 mm) com um ângulo de 30° (ASABE, 2009). As leituras foram feitas em transectos de modo a realizar 20 leituras por tratamento. Para determinação da umidade do solo no momento das leituras, foram coletadas amostras de solo (3 repetições) nas camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 que foram secas em estufa de ar forçado à 65°C até peso constante. A umidade do solo na primeira e na segunda avaliação era de 0,25 g g⁻¹ e de 0,23 g g⁻¹, respectivamente.

A determinação da produtividade da soja foi realizada através da colheita de 3 repetições de 4 metros lineares de soja. A umidade dos grãos foi determinada em cada repetição e a produtividade foi corrigida para a umidade de 13%.

Os resultados da análise química, de resistência à penetração e produtividade foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk, análise de variância (ANOVA) e posteriormente, tiveram suas médias comparadas pelo teste de Tukey à 5% de significância, utilizando o software R (R Core Team, 2019).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização química e física do solo anteriormente à aplicação dos tratamentos

O solo selecionado para a realização do experimento foi um Latossolo Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA, 2018), o qual naturalmente é mais ácido e pobre em nutrientes nas suas camadas mais profundas, apresentando uma redução da qualidade química com o avanço da profundidade do solo, principalmente quando os mesmos são manejados sob SPD de longa duração (Amado *et al.*, 2009). Pode-se verificar no Quadro 1, que todas as camadas amostradas apresentaram atributos do solo, tais como o pH e a saturação por bases,

abaixo do limite proposto pela CQFS-RS/SC (2016) ($pH < 5,5$ e $V\% < 65\%$). A saturação por alumínio (m) nas camadas abaixo de 20 cm também estão acima do limite proposto pela CQFS-RS/SC (2016) ($m < 10\%$). Estas condições evidenciam a necessidade da aplicação de corretivo no solo capaz de promover a atenuação das limitações anteriormente descritas.

Em relação aos atributos físicos do solo, pode-se verificar no Quadro 1, o aumento dos valores de RP do solo até os 40 cm de profundidade, ao passo que, nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m estes valores ultrapassaram o limite crítico proposto por Klein e Camara (2007), que determinam que resistências superiores à 2,0 MPa são limitantes para o crescimento e desenvolvimento, tanto das raízes, quanto da parte aérea das culturas.

Para superar o problema da compactação subsuperficial do solo, algumas práticas de manejo podem ser utilizadas, tais como a rotação de culturas, a escarificação e a subsolagem. Botta *et al.* (2010) reportaram em seu trabalho que o uso da escarificação e da subsolagem foi eficiente na atenuação da compactação do solo e pode acarretar no incremento da produtividade das culturas (Liu *et al.*, 2016).

Variabilidade da precipitação pluvial durante o ciclo da soja

A disponibilidade hídrica é um dos fatores climáticos que mais afetam a produtividade agrícola, sendo este o fator que rege a distribuição das espécies em diferentes zonas climáticas (Morando *et al.*, 2014). A produtividade da cultura da soja pode variar conforme a quantidade e a distribuição da precipitação durante o ciclo da cultura (Franke e Dorfman, 2000) e, para possibilitar a obtenção de elevadas produtividades em áreas não irrigadas, é necessário que a oferta hídrica permaneça entre 650 e 700 mm (EMBRAPA, 2007). A cultura da soja necessita em média $7,5 \text{ mm dia}^{-1}$ de água no seu período mais crítico (florescimento) e, se neste período a disponibilidade de água for insuficiente, as plantas podem ter seu crescimento e desenvolvimento prejudicados, refletindo diretamente na sua produtividade.

Na Figura 1, é possível observar a diferença da disponibilidade hídrica à cultura da soja entre as safras avaliadas. Na safra 2016/17, a precipitação

acumulada foi de 688,5 mm e o ciclo da soja foi de 146 dias, o que forneceu em média $4,71 \text{ mm dia}^{-1}$. Na safra 2017/18, a precipitação acumulada durante o ciclo de 132 dias foi de 499 mm, o que forneceu em média $3,78 \text{ mm dia}^{-1}$ de água às plantas.

Resistência mecânica à penetração do solo após a aplicação dos tratamentos

O uso de ferramentas mecânicas de descompactação foi eficiente para reduzir os valores de RP do solo (Figura 2), pois, de acordo com Abreu *et al.* (2004), ao realizarem a mobilização, essas ferramentas atuam na redução da coesão do solo. Reiner *et al.* (2008) também relatam a eficiência destas ferramentas para a mitigação da compactação, as quais afetam também a taxa de infiltração, a capacidade de armazenamento de água no solo, reduzem a densidade do solo e aumentam a macroporosidade do solo (Colussi *et al.*, 2014).

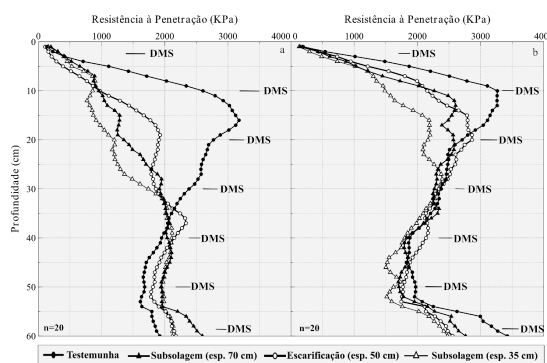


Figura 2 - Teste de DMS (Tukey à 5% de significância) da resistência à penetração do solo; a) 6 meses após a implantação dos tratamentos; b) 18 meses após a implantação dos tratamentos. DMS – diferença mínima significativa; esp. – espaçamento entre passadas da haste subsoladora.

É possível observar na Figura 2a que os valores de RP até a camada de 35 cm não ultrapassaram os 2,0 MPa quando utilizadas estratégias de manejo mecânico de descompactação do solo, sendo que este valor é considerado como limite crítico para o crescimento radicular e desenvolvimento das culturas. No entanto, pode-se verificar que após 18 meses da descompactação mecânica (Figura 2b), este efeito foi reduzido. Esse comportamento corrobora com o observado por Busscher *et al.* (2000),

os quais afirmam que solos profundos como os Latossolos com precipitação abundante durante o ano, possuem elevado risco de re-compactação após serem realizadas operações mecânicas de descompactação do solo. De acordo com Drescher *et al.* (2016), os efeitos da escarificação mecânica sobre a resistência à penetração do solo vão sendo atenuados ao longo do tempo e podem persistir por até 24 meses. Reichert *et al.* (2009b) reportam que os efeitos da escarificação não são observados a médio ou longo prazo, podendo persistir no solo por período igual ou inferior a um ano.

Atributos químicos do solo afetados pela aplicação dos tratamentos

Após 6 meses da aplicação dos tratamentos, não houve efeito significativo dos tratamentos sobre os valores de pH, m e saturações por Ca e Mg a partir

de 20 cm de profundidade (Quadro 2). Esse comportamento pode ser atribuído ao pouco tempo decorrido após a aplicação, o qual possivelmente não tenha sido suficiente para possibilitar a completa solubilização e reação dos corretivos utilizados, inclusive daqueles que foram incorporados no solo. Fidalski *et al.* (2015) também não observaram efeito significativo da incorporação de calcário em um Latossolo argiloso sobre estes atributos após 6 meses da aplicação.

No entanto, ao associar a subsolagem na linha e na entrelinha (com espaçamento de 35 cm) com a aplicação profunda de óxido de Ca e Mg (T8), é possível observar na primeira amostragem o incremento de pH e redução da m na camada de 10-20 cm. No entanto, após 18 meses da aplicação, os efeitos desse tratamento foram ainda mais evidenciados (Quadro 3). Nele foram observados os maiores valores de pH e saturações por Ca e Mg,

Quadro 2 - Efeito dos tratamentos sobre os atributos químicos 6 meses após a aplicação

Prof. (cm)	Tratamentos								
	Test.	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
pH (H₂O)									
0-10	5,25 ^b	5,45 ^{ab}	5,20 ^b	5,13 ^b	5,60 ^a	5,33 ^{ab}	5,25 ^{ab}	5,45 ^{ab}	5,28 ^{ab}
10-20	5,10 ^{ab}	5,40 ^a	5,10 ^{ab}	4,90 ^b	5,25 ^{ab}	5,23 ^{ab}	5,10 ^{ab}	5,20 ^{ab}	5,43 ^a
20-40	5,18 ^{ns}	5,35 ^{ns}	5,08 ^{ns}	5,20 ^{ns}	5,25 ^{ns}	5,30 ^{ns}	5,18 ^{ns}	5,33 ^{ns}	5,53 ^{ns}
40-60	5,18 ^{ns}	5,23 ^{ns}	5,05 ^{ns}	5,10 ^{ns}	5,10 ^{ns}	5,28 ^{ns}	5,18 ^{ns}	5,25 ^{ns}	5,38 ^{ns}
m (%)									
0-10	2,00 ^b	1,13 ^{ab}	4,08 ^{ab}	11,95 ^a	0,30 ^b	3,45 ^{ab}	1,20 ^b	1,20 ^b	3,30 ^{ab}
10-20	9,95 ^{bc}	2,18 ^{bc}	11,25 ^{bc}	27,93 ^a	6,93 ^{bc}	13,70 ^b	4,83 ^{bc}	5,73 ^{bc}	1,75 ^c
20-40	13,28 ^{ns}	4,50 ^{ns}	17,35 ^{ns}	17,95 ^{ns}	10,90 ^{ns}	15,25 ^{ns}	7,30 ^{ns}	4,98 ^{ns}	2,25 ^{ns}
40-60	16,75 ^{ns}	12,08 ^{ns}	22,35 ^{ns}	23,08 ^{ns}	22,28 ^{ns}	22,28 ^{ns}	13,40 ^{ns}	9,25 ^{ns}	7,55 ^{ns}
Sat. Ca (%)									
0-10	41,45 ^{abc}	47,35 ^{ab}	40,95 ^{abc}	32,80 ^c	52,00 ^a	43,75 ^{abc}	49,23 ^{ab}	47,48 ^{ab}	39,15 ^{bc}
10-20	32,95 ^{abc}	45,58 ^a	33,48 ^{abc}	20,83 ^c	36,70 ^{ab}	32,13 ^{bc}	37,60 ^{ab}	37,80 ^{ab}	40,33 ^{ab}
20-40	29,83 ^{ns}	37,30 ^{ns}	26,08 ^{ns}	30,80 ^{ns}	34,10 ^{ns}	30,73 ^{ns}	37,43 ^{ns}	36,20 ^{ns}	39,45 ^{ns}
40-60	26,10 ^{ns}	31,25 ^{ns}	23,43 ^{ns}	23,48 ^{ns}	22,28 ^{ns}	26,08 ^{ns}	28,70 ^{ns}	29,43 ^{ns}	30,73 ^{ns}
Sat. Mg (%)									
0-10	12,58 ^b	11,58 ^b	9,58 ^b	8,75 ^b	18,33 ^a	12,20 ^b	11,95 ^b	12,48 ^b	9,25 ^b
10-20	9,35 ^{ab}	12,43 ^a	9,00 ^{ab}	5,90 ^b	11,25 ^a	9,50 ^{ab}	9,73 ^{ab}	9,40 ^{ab}	10,93 ^a
20-40	9,60 ^{ns}	11,25 ^{ns}	8,15 ^{ns}	11,70 ^{ns}	11,73 ^{ns}	9,85 ^{ns}	11,78 ^{ns}	10,03 ^{ns}	12,43 ^{ns}
40-60	9,55 ^{ns}	10,88 ^{ns}	9,00 ^{ns}	9,88 ^{ns}	8,58 ^{ns}	9,68 ^{ns}	11,23 ^{ns}	9,73 ^{ns}	11,10 ^{ns}
S (mg dm⁻³)									
0-10	7,58 ^{ns}	9,63 ^{ns}	8,20 ^{ns}	6,80 ^{ns}	8,18 ^{ns}	6,05 ^{ns}	11,60 ^{ns}	12,15 ^{ns}	9,23 ^{ns}
10-20	16,50 ^{ab}	5,10 ^d	8,35 ^{cd}	17,38 ^a	8,78 ^{bcd}	9,70 ^{abcd}	16,60 ^a	15,33 ^{abc}	11,55 ^{abcd}
20-40	12,10 ^{ab}	8,33 ^{ab}	9,48 ^{ab}	9,00 ^{ab}	7,93 ^{ab}	7,48 ^b	13,73 ^{ab}	13,93 ^a	11,23 ^{ab}
40-60	15,53 ^{ab}	8,95 ^b	12,90 ^{ab}	12,10 ^{ab}	13,35 ^{ab}	14,73 ^{ab}	15,20 ^{ab}	18,90 ^a	18,03 ^a

Prof. - Profundidade; m - Saturação por alumínio; Sat. Ca - Saturação por cálcio; Sat. Mg - Saturação por magnésio; S - Enxofre; Test. - Testemunha; T1 - Subsolagem com espaçamento de 70 cm; T2 - Escarificação com espaçamento de 50 cm; T3 - Subsolagem com espaçamento de 70 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg com espaçamento de 70 cm; T4 - Escarificação com espaçamento de 50 cm + aplicação superficial de óxido de Ca e Mg; T5 - Aplicação superficial de óxido de Ca e Mg; T6 - Aplicação de calcário + gesso em superfície; T7 - Aplicação de óxido de Ca e Mg + calcário + gesso em superfície; T8 - Subsolagem com espaçamento de 35 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg com espaçamento de 70 cm.

Quadro 3 - Efeito dos tratamentos sobre os atributos químicos 18 meses após a aplicação

Prof. (cm)	Tratamentos								
	Test.	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
pH (H₂O)									
0-10	5,25 ^{ns}	5,25 ^{ns}	5,10 ^{ns}	5,45 ^{ns}	5,50 ^{ns}	5,48 ^{ns}	5,33 ^{ns}	5,43 ^{ns}	5,68 ^{ns}
10-20	5,10 ^{ab}	4,88 ^b	4,78 ^b	5,20 ^{ab}	5,20 ^{ab}	5,10 ^{ab}	5,08 ^{ab}	5,43 ^a	5,48 ^a
20-40	5,10 ^b	4,83 ^b	4,83 ^b	5,20 ^{ab}	5,18 ^{ab}	5,20 ^{ab}	5,18 ^{ab}	5,23 ^{ab}	5,65 ^a
40-60	5,03 ^b	4,80 ^b	4,80 ^b	5,25 ^{ab}	5,08 ^b	5,23 ^{ab}	5,20 ^{ab}	5,35 ^{ab}	5,75 ^a
m (%)									
0-10	4,80 ^{ns}	3,58 ^{ns}	7,03 ^{ns}	0,70 ^{ns}	2,53 ^{ns}	1,95 ^{ns}	4,25 ^{ns}	3,33 ^{ns}	0,00 ^{ns}
10-20	11,4 ^{abc}	19,30 ^{ab}	22,73 ^a	6,28 ^{bc}	9,75 ^{abc}	9,58 ^{abc}	15,60 ^{abc}	4,93 ^{bc}	2,08 ^c
20-40	15,98 ^{ab}	29,90 ^a	31,20 ^a	7,38 ^b	13,48 ^{ab}	13,18 ^{ab}	14,08 ^{ab}	8,35 ^b	0,00 ^b
40-60	20,78 ^{ab}	35,25 ^a	35,98 ^a	11,68 ^b	20,85 ^{ab}	15,45 ^{ab}	15,13 ^{ab}	4,88 ^b	0,00 ^b
Sat. Ca (%)									
0-10	44,70 ^{ns}	38,90 ^{ns}	38,88 ^{ns}	48,95 ^{ns}	43,95 ^{ns}	48,03 ^{ns}	43,73 ^{ns}	42,38 ^{ns}	46,15 ^{ns}
10-20	31,43 ^{ab}	26,28 ^b	24,15 ^b	38,98 ^{ab}	35,33 ^{ab}	35,00 ^{ab}	30,83 ^{ab}	41,13 ^{ab}	45,05 ^a
20-40	29,25 ^{abc}	19,55 ^c	22,28 ^{bc}	36,65 ^{ab}	32,50 ^{abc}	33,95 ^{abc}	30,18 ^{abc}	32,95 ^{abc}	41,55 ^a
40-60	26,28 ^{ab}	19,00 ^b	18,90 ^b	35,53 ^a	26,33 ^{ab}	27,38 ^{ab}	28,65 ^{ab}	32,50 ^{ab}	41,88 ^a
Sat. Mg (%)									
0-10	12,13 ^{ns}	9,58 ^{ns}	9,23 ^{ns}	11,40 ^{ns}	13,00 ^{ns}	11,30 ^{ns}	8,50 ^{ns}	14,73 ^{ns}	10,08 ^{ns}
10-20	7,43 ^{ab}	6,55 ^b	6,00 ^{ab}	8,33 ^{ab}	10,10 ^{ab}	8,08 ^{ab}	7,20 ^{ab}	12,40 ^a	9,78 ^{ab}
20-40	7,83 ^{ns}	5,98 ^{ns}	5,98 ^{ns}	8,15 ^{ns}	9,88 ^{ns}	10,25 ^{ns}	8,05 ^{ns}	8,65 ^{ns}	9,73 ^{ns}
40-60	8,33 ^{ab}	6,35 ^b	5,58 ^b	9,65 ^{ab}	8,15 ^{ab}	8,43 ^{ab}	8,75 ^{ab}	9,88 ^{ab}	11,35 ^a
S (mg dm⁻³)									
0-10	13,40 ^{ns}	14,80 ^{ns}	12,60 ^{ns}	14,73 ^{ns}	12,53 ^{ns}	15,90 ^{ns}	17,73 ^{ns}	15,13 ^{ns}	16,95 ^{ns}
10-20	15,28 ^{ns}	14,45 ^{ns}	14,38 ^{ns}	12,80 ^{ns}	13,08 ^{ns}	12,00 ^{ns}	16,40 ^{ns}	16,05 ^{ns}	16,08 ^{ns}
20-40	16,45 ^{ab}	12,33 ^b	15,03 ^{ab}	15,05 ^{ab}	14,40 ^{ab}	12,30 ^b	21,30 ^a	18,25 ^{ab}	15,35 ^{ab}
40-60	14,10 ^{ns}	13,50 ^{ns}	13,18 ^{ns}	14,05 ^{ns}	13,70 ^{ns}	13,20 ^{ns}	19,08 ^{ns}	19,63 ^{ns}	18,33 ^{ns}

Prof. - Profundidade; m - Saturação por alumínio; Sat. Ca - Saturação por cálcio; Sat. Mg - Saturação por magnésio; S - Enxofre; Test. - Testemunha; T1 - Subsolação com espaçamento de 70 cm; T2 - Escarificação com espaçamento de 50 cm; T3 - Subsolação com espaçamento de 70 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg com espaçamento de 70 cm; T4 - Escarificação com espaçamento de 50 cm + aplicação superficial de óxido de Ca e Mg; T5 - Aplicação superficial de óxido de Ca e Mg; T6 - Aplicação de calcário + gesso em superfície; T7 - Aplicação de óxido de Ca e Mg + calcário + gesso em superfície; T8 - Subsolação com espaçamento de 35 cm + aplicação profunda de óxido de Ca e Mg com espaçamento de 70 cm.

além da maior redução da m na camada de 10 a 60 cm, o que pode ser atribuído ao maior volume de água infiltrada no solo resultante da redução da coesão, à elevada precipitação no período e à maior interface solo-corretivo, os quais auxiliam na reação e solubilização do óxido de Ca e Mg aplicado em profundidade (Calonego *et al.*, 2017; Mantovani *et al.*, 2017). A granulometria do óxido de Ca e Mg (<0,0053 mm) (CQFS-RS/SC, 2016) é inferior à do calcário e, portanto, também pode ter facilitado a solubilização deste corretivo nesse tratamento.

A aplicação combinada de calcário e gesso agrícola (T6) não foi eficiente para aumentar o pH e reduzir a saturação por alumínio do solo, discordando do encontrado por Dalla Nora *et al.* (2017), que identificou a redução da saturação por alumínio após 15 meses da aplicação de calcário e gesso agrícola

no solo. No entanto, ao associar o óxido de Ca e Mg à combinação (T7), pode-se verificar que houve incremento dos valores de pH e redução da saturação por alumínio, após 18 meses da aplicação, principalmente nas camadas abaixo dos 10 cm. Mantovani *et al.* (2017) também não reportaram respostas significativas do teor de Ca e Mg no solo com a aplicação de calcário e gesso em superfície.

Após 18 meses da aplicação dos tratamentos (Quadro 3), é possível verificar que o uso isolado de estratégias mecânicas de descompactação do solo (T1 e T2) apresentou os menores valores de pH, maiores valores de m e menores saturações por Ca e Mg em todas as camadas analisadas. Estes resultados corroboram com o observado por Rossato *et al.* (2009), e podem ser atribuídos à mobilização do solo, que mesmo reduzida, pode aumentar a

superfície de contato do solo com os resíduos vegetais e pode incrementar a velocidade de decomposição dos mesmos pelos microrganismos, causando a liberação de ácidos orgânicos e a redução dos valores de pH do solo (Sidiras e Pavan, 1985).

Produtividade da soja afetada pela aplicação dos tratamentos

A produtividade de soja (Figura 3), em ambas as safras avaliadas, não apresentou diferença estatística significativa entre os tratamentos ($p < 0,05$). Este comportamento também foi observado por Purcell *et al.* (2002) e Fidalski *et al.* (2015) ao analisar a produtividade de soja em resposta à aplicação de estratégias de melhoria física e química do solo em subsuperfície, respectivamente. Além disso, a determinação da RP pode não ter sido capaz de representar as condições originais do solo, dificultando a interpretação dos efeitos da compactação mecânica sobre o crescimento de raízes e, conseqüentemente, sobre a produtividade.

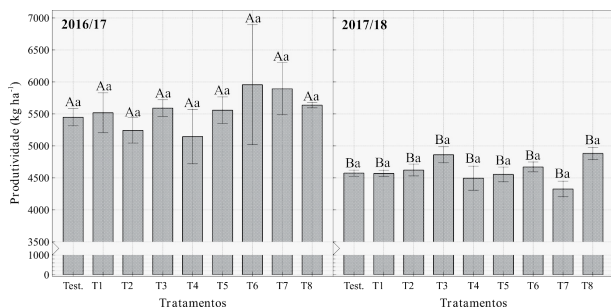


Figura 3 - Efeito dos tratamentos sobre a produtividade da soja nas duas safras avaliadas (2016/17 e 2017/18). Letras maiúsculas comparam safras e letras minúsculas comparam tratamentos pelo teste de Tukey à 5% de significância.

A consequência das limitações químicas e físicas do perfil do solo para a produtividade agrícola baseia-se principalmente na restrição ao crescimento radicular e na absorção de água e nutrientes pelas culturas. Neste estudo, o efeito da redução da resistência à penetração, da acidez e da deficiência de cálcio da subsuperfície poderia ter sido evidenciado se a cultura tivesse sido submetida ao estresse hídrico, como o observado por Hansel *et al.* (2017) ao incorporar fósforo no solo, pois entre as safras avaliadas houve diferença significativa dos rendimentos da soja, o que pode ser explicado pela diferença de precipitação incidente entre as safras (Figura 1).

CONCLUSÕES

A escarificação e a subsolagem são estratégias eficientes para aliviar a resistência à penetração do solo. No entanto, após 18 meses, este efeito é reduzido.

Após 18 meses da aplicação dos tratamentos, a subsolagem com espaçamento de 35 cm associada à aplicação profunda de óxido de Ca e Mg com espaçamento de 70 cm foi eficiente para aumentar o pH e a saturação por Ca, além de neutralizar a saturação por alumínio até 60 cm de profundidade.

O efeito dos tratamentos não resultou em incrementos de produtividade em ambas as safras avaliadas.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, S.L.; Reichert, J.M. & Reinert, D.J. (2004) – Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 28, n. 3, p. 519-531. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000300013>
- Amado, T.J.C.; Pes, L.Z.; Lemainski, C.L. & Schenato, R.B. (2009) – Atributos químicos e físicos de latossolos e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 33, n. 4, p. 831–843. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000400008>

- ASABE (2009) – *Soil cone penetrometer: ASAE standard S313.3*. St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Bengough, A.G.; McKenzie, B.M.; Hallet, P.D. & Valentine, T.A. (2011) – Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany*, vol. 62, n. 1, p. 59–68. <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/erq350>
- Beulter, A.N. & Centurion, J.F. (2004) – Compactação do solo e suas relações no desenvolvimento radicular e produtividade do feijoeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 39, n. 6, p. 581–588. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2004000600010>
- Botta, G.F.; Tolon-Becerra, A.; Lastra-Bravo, X. & Tourn, M. (2010) – Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max* L.) yields in Argentinean pampas. *Soil and Tillage Research*, vol. 110, n. 1, p. 167–174. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2010.07.001>
- Busscher, W.J.; Frederick, J.R. & Bauer, P.J. (2000) – Timing effects of deep tillage on penetration resistance and wheat and soybean yield. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 64, n. 3, p. 999–1003. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2000.643999x>
- Calonego, J.C.; Raphael, J.P.A.; Rigon, J.P.G.; Neto, L.O. & Rosolem, C.A. (2017) – Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. *European Journal of Agronomy*, vol. 85, p. 31–37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2017.02.001>
- Colussi, G.; Da Silva, L.S. & Minato, E.A. (2014) – Escarificação e adubação orgânica: efeito na recuperação estrutural de solo produzindo Tifton 85. *Ciência Rural*, vol. 44, n. 11, p. 1956–1961. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20131670>
- CQFS-RS/SC (2016) – *Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. 11ª.ed. Comissão de Química e Fertilidade do Solo. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul/UFRGS.
- Dalla Nora, D. & Amado, T.J.C. (2013) – Improvement in chemical attributes of Oxisol subsoil and crop yields under no-till. *Agronomy Journal*, vol. 105, n. 5, p. 1393–1403. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2013.0031>
- Dalla Nora, D.; Amado, T.J.C.; Nicoloso, R.S.; Mazuco, A.C.B & Piccin, M. (2017) – Mitigation of the gradient of chemical properties in the rooting zone of dystrophic oxisols by gypsum and lime inputs under a no-till system. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 41, art. e0150541. <http://dx.doi.org/10.1590/18069657rbc20150541>
- Drescher, M.S.; Reinert, D.J.; Denardin, J.E.; Gubiani, P.I.; Faganello, A. & Drescher, G.L. (2016) – Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 51, n. 2, p. 159–168. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2016000200008>
- EMBRAPA (2007) – *Ecofisiologia da soja*. Londrina: Embrapa soja, p. 8. (Circular Técnica n. 48).
- EMBRAPA (2018) – *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 5ª. ed. Brasília: Embrapa – CNPS.
- IUSS Working Group WRB (2014) – *World Reference Base for Soil Resources 2014*. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports No. 106 FAO, Rome.
- Fidalski, J.; Yagi, R. & Tormena, C.A. (2015) – Revolvimento ocasional e calagem em latossolo muito argiloso em sistema plantio direto consolidado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 39, n. 5, p. 1483–1489. <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbc20140428>
- Franke, A.E & Dorfman, R. (2000) – Necessidade de irrigação suplementar em soja nas condições edafoclimáticas do Planalto Médio e Missões, RS. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 35, n. 8, p. 1675–1683. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2000000800022>
- Hansel, F.D.; Amado, T.J.C.; Diaz, D.A.R.; Rosso, L.H.M; Nicoloso, F.T. & Schorr, M. (2017) – Phosphorus fertilizer placement and tillage affect soybean root growth and drought tolerance. *Agronomy Journal*, vol. 109, n. 6, p. 2936–2944. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2017.04.0202>
- Hobbs, P.R.; Sayre, K. & Gupta, R. (2008) – The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 363, n. 1491, p. 543–555. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2007.2169>
- Kassam, A.; Friedrich, T.; Derpsch, R. & Kienzle, J. (2015) – Overview of the worldwide spread of conservation agriculture. *Field Actions Science Reports*, vol. 8, n. 1, p. 1–11.

- Klein, V.A. & Camara, R.K. (2007) – Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 31, n. 2, p. 221–227. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832007000200004>
- Köppen, W.P. (1938) – Das geographic system der climate. In: Köppen, W. and Geiger, R. (Eds.) – *Handbuch der Klimatologie*. C.G. Borntrager, Berlin, p. 1-44.
- Liu, Z.; Qin, A.; Zhao, B.; Ata-Ul-Karim, S.T.; Xiao, J.; Sun, J.; Ning, D.; Liu, Z. & Duan, A. (2016) – Yield response of spring maize to inter-row subsoiling and soil water deficit in Northern China. *PLoS One*, vol. 11, art. 0153809. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0153809>
- Mantovani, A.; Felício, T.P.; Menosso, A.; Bulla, P.; Mecabô, D.P. & Miotto, P.C.M. (2017) – Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de gesso e calcário. *Scientific Electronic Archives*, vol. 10, n. 5, p. 35–43.
- Morando, R.; Da Silva, A.O.; Carvalho, L.C. & Pinheiro, M.P.M.A. (2014) – Déficit hídrico: efeito sobre a cultura da soja. *Journal of Agronomic Sciences*. vol. 3. n. esp, p. 114–129.
- Pöttker, D. & Ben, J.R. (1998) – Calagem para uma rotação de culturas no Sistema Plantio Direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 22, n. 4, p. 675–684. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06831998000400013>
- Purcell, L.C.; Keisling, T.C. & Sneller, C.H. (2002) – Soybean yield and water extraction in response to deep tillage and high soil aluminum. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 33, n. 19–20, p. 3723–3735. <http://dx.doi.org/10.1081/CSS-120015917>
- R Core Team. (2019) – *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria. <https://www.r-project.org/>
- Reichert, J.M.; Susuki, L.E.A.S.; Reinert, D.J.; Horn, R. & Hakansson, I. (2009a) – Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, vol. 102, n. 2, p. 242–254. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>
- Reichert, J.M.; Kaiser, D.R.; Reinert, D.J. & Riquelme, U.F.B. (2009b) – Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 44, n. 3, p. 310–319. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2009000300013>
- Reinert, D.J.; Albuquerque, J.A.; Reichert, J.M.; Aita, C.; Andrada, M.M.C. (2008) – Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 32, n. 5, p. 1805–1816. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000500002>
- Rossato, O.B.; Ceretta, C.A.; Da Silva, L.S.; Brunetto, G.; Adorna, J.C.; Giroto, E. & Lorenzi, C.R. (2009) – Correção da acidez do solo em subsuperfície de um Latossolo de textura franco-arenosa sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 33, n. 3, p. 659–667. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832009000300018>
- Schick, J.; Bertol, I.; Balbinot Júnior, A.A. & Batistela, O. (2014) – Erosão hídrica em cambissolo húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: II. perdas de nutrientes e carbono orgânico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 24, n. 2, p. 437–447. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832000000200020>
- Sidiras, N. & Pavan, M.A. (1985) – Influência do sistema de manejo do solo no seu nível de fertilidade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 9, p. 249–254.
- Soratto, R.P & Crusciol, C.A.C. (2008) – Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema plantio direto recém-implantado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 32, n. 2, p. 675–688. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000200022>
- Taylor, H.M.; Robertson, G.M. & Parker, J.J. (1966) – Soil strength root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. *Soil Science*, vol. 102, n. 1, p. 18–22.
- Tedesco, M.J.; Gianello, C.; Bissani, C.A.; Bohnen, H. & Volkweiss, S.J. (1995) – *Análise de solo, plantas e outros materiais*. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 174p. (Boletim Técnico n. 5).
- Whiteley, G.M; Utomo, W.H. & Dexter, A.R. (1981) – A comparison of penetrometer pressures and the pressures exerted by roots. *Plant and Soil*, vol. 61, p. 351–364. <https://doi.org/10.1007/BF02182016>