



ALESSANDRO ALVARENGA PEREIRA DA SILVA

**DESCOMPACTAÇÃO DO SOLO E SEUS EFEITOS NOS
ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS E PRODUTIVIDADE DE
GRÃOS**

**LAVRAS - MG
2019**

ALESSANDRO ALVARENGA PEREIRA DA SILVA

**DESCOMPACTAÇÃO DO SOLO E SEUS EFEITOS NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS
E FÍSICOS E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Silvino Guimarães Moreira
Orientador

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva
Coorientador

**LAVRAS - MG
2019**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Alessandro Alvarenga Pereira da.

Descompactação do solo e seus efeitos nos atributos químicos e físicos e produtividade de grãos / Alessandro Alvarenga Pereira da Silva. - 2019.

48 p. : il.

Orientador(a): Silvino Guimarães Moreira.

Coorientador(a): Bruno Montoani Silva.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2019.

Bibliografia.

1. Sistema de plantio direto. 2. Atributos químicos. 3. Atributos físicos. I. Moreira, Silvino Guimarães. II. Silva, Bruno Montoani. III. Título.

ALESSANDRO ALVARENGA PEREIRA DA SILVA

**DESCOMPACTAÇÃO DO SOLO E SEUS EFEITOS NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS
E FÍSICOS E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS**

**SOIL DECOMPACTION AND ITS EFFECTS ON CHEMICAL AND PHYSICAL
ATTRIBUTES, AND GRAIN YIELD**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 17 de abril de 2019

Dr. Alex Teixeira Andrade EPAMIG

Dr. Élberis Pereira Botrel UFLA

Prof. Dr. Silvino Guimarães Moreira
Orientador

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva
Coorientador

**LAVRAS - MG
2019**

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me guiar, iluminar e me dar serenidade para seguir em frente com os meus objetivos, e não desanimar com as dificuldades.

Aos meus pais, Rogério e Ângela. Obrigado por todo o esforço, amizade e conselhos para a minha formação pessoal e profissional. À minha irmã Raísa e demais familiares, pelo apoio e tempo de convívio sacrificado para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Agricultura (DAG), pela oportunidade concedida para a realização do mestrado.

Ao professor e orientador Dr. Silvino Guimarães Moreira, por auxiliar na minha formação profissional, por sua amizade e ensinamentos. Profissional exemplar, pelo qual tenho grande admiração e gratidão.

Ao professor Bruno Montoani Silva, pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa.

Aos funcionários do DAG, em especial aos do Setor de Grandes Culturas, Antônio, Edésio, Ezequiel e Arnald, pelo auxílio, suporte de infraestrutura e amizade.

A toda a equipe da Fazenda Santa Helena, Grupo G7, em especial ao Evandro e Leandro, por ter cedido parte de sua área comercial, e acreditar que a pesquisa é motora de novos conhecimentos.

Ao 3rlab, pela liberação para cursar o Mestrado e por todo o auxílio nas análises de solo. Isso foi possível por tratarem o caso de forma especial e acreditarem no desenvolvimento humano e profissional. Saibam que serei eternamente grato por isso!

À equipe do Laboratório de Física do Solo, Dulce e Teo, pelo espaço e uso dos equipamentos para a realização de partes do experimento. Em especial ao Devison, amigo que fiz durante o mestrado, e que esteve presente nas atividades de campo e desenvolvimento da dissertação.

Aos colegas de orientação e integrantes do grupo GMAP, em especial ao Flávio, Júlia, Guilherme, Inara, Carine, Daniel, Júnior, Hugo, Fabinho e demais, pela disposição durante a pesquisa. É um prazer trabalhar ao lado de pessoas tão dedicadas.

À minha namorada Ana Maria, pelo companheirismo, amor, apoio em todos os momentos e singular torcida. Obrigado por todo amor e dedicação.

Aos amigos que mesmo de longe deram todo apoio e incentivo.

MUITO OBRIGADO!

*“Ai de nós, se a semente morrer
semente” (Pe Juarez Pedro de Castro)*

RESUMO

Atualmente, em muitas áreas sob sistema de plantio direto (SPD), têm sido realizadas duas safras por ano, chegando em algumas situações com até três cultivos por ano, por exemplo, nos sistemas com milho verão, seguido de feijão e, posteriormente, aveia ou trigo. Com isso, tem aumentando muito o tráfego de máquinas nas áreas, podendo surgir solos com camadas compactadas. Dessa forma, objetivou-se avaliar a prática da subsolagem, bem como a aplicação de corretivos em subsuperfície, visando a melhoria das condições químicas e físicas do solo, e seus efeitos na produtividade das culturas em um sistema de produção com culturas anuais. Para isso, foi selecionada uma área sob SPD há dez anos e instalado um experimento de campo com os seguintes tratamentos: SPD - áreas sob plantio direto; SB2 = área sob subsolagem profunda a cada dois anos; SB3 - área sob subsolagem profunda a cada três anos; SBC - área com subsolagem profunda e com enterrio de 1440 kg ha⁻¹ de calcário (30% de MgO, 60% de CaO, PRNT de 175% e PN de 183%). Na média de todos os tratamentos, os maiores valores de Ca e Mg foram observados na camada de 0 a 20 cm compara às demais camadas. Ao considerar as profundidades 0 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm, os valores de V% foram maiores no tratamento com enterrio de calcário (SBC), comparado ao SPD, após dois anos da aplicação do corretivo. Ao avaliar a resistência à penetração, verifica-se que não foram encontrados valores superiores a 2,0 MPa, neste sentido, não houve nenhuma restrição física ao desenvolvimento das culturas. As formas de descompactação variando o tempo e enterrio de calcário não promoveram aumentos significativos de produtividade em relação ao tratamento SPD.

Palavras-chave: Sistema de plantio direto. Atributos químicos. Atributos físicos.

ABSTRACT

Currently in many areas under no-tillage system (SPD), two harvests have been carried out per year, reaching in some situations up to three crops per year, for example, in systems with summer corn, followed by beans and, later, oats or wheat. With this, the traffic of machines in the areas has increased greatly, being able to appear soils with compacted layers. The objective of this study was to evaluate the practice of subsoiling, as well as the application of correctives in subsurface, aiming to improve soil chemical and physical conditions, and its effects on crop productivity in a production system with annual crops. For this, an area under SPD was selected ten years ago and a field experiment was installed with the following treatments: SPD - areas under no-tillage; SB2 = area under deep subsoiling every two years; SB3 - area under deep subsoiling every three years; SBC - deep and underwater subsoil area of 1440 kg ha⁻¹ limestone (30% MgO, 60% CaO, 175% PRNT and 183% PN). In the average of all treatments, the highest Ca and Mg values were observed in the 0 to 20 cm layer compared to the other layers. When considering the depths 0 to 20, 20 to 40 and 40 to 60 cm, V% values were higher in the treatment with limestone (SBC), compared to SPD, after two years of the application of the corrective. When evaluating the resistance to penetration it is verified that no values higher than 2,0 MPa were found, in this sense, there was no physical restriction to the development of the cultures. The decomposition forms varying the time and limestone did not promote significant increases in productivity in relation to the SPD treatment.

Key words: No-tillage system. Chemical attributes. Physical attributes.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	Sistema de semeadura direta	12
2.2	Práticas corretivas nos atributos químicos do solo.....	13
2.3	Crescimento radicular	16
2.4	Resistência do solo à penetração e atributos físicos do solo.....	18
2.5	Utilização de subsoladores	19
3	MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1	Local experimental e ensaio de campo.....	22
3.2	Avaliação dos atributos químicos	26
3.3	Avaliação dos atributos físicos.....	26
3.4	Avaliação da produtividade das culturas	27
3.5	Análise estatística.....	27
3.6	Relação entre os atributos químicos, físicos e produtividade	28
4	RESULTADOSE DISCUSSÃO	29
4.1	Atributos químicos.....	29
4.2	Atributos físicos.....	35
4.3	Produtividade das culturas	38
5	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

O Brasil tem apresentado um grande destaque na produção de grãos a cada ano, o que pode ser observado pelo aumento de produção e produtividade das culturas ao longo dos últimos 10 anos. Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, entre a safra 2007/2008 e a safra 2017/2018, o país apresentou um incremento de 84 milhões de toneladas de grãos e um aumento de 14 milhões de hectares na área cultivada com grãos. Dentre as culturas com maior ganho de produtividade destacam-se a soja e o milho. A safra 2017/2018, de soja, alcançou produção recorde com 119,3 milhões de toneladas, sendo 4,6% superior à safra 2016/2017 (CONAB, 2018). Segundo projeções do MAPA (2017), o Brasil apresentará um aumento de 24,2% na produção de grãos e 17,3% em área compreendido entre as safras de 2016/17 a 2026/27.

Os principais fatores que contribuíram com esse aumento de produtividade foram o desenvolvimento de novos cultivares, melhoria no manejo do solo e, principalmente, o aumento da adoção do sistema de plantio direto (SPD). Atualmente, estima-se que existam no Brasil cerca de 33 milhões de hectares sob SPD (IBGE, 2017).

O estado de Minas Gerais destaca-se como o principal produtor de grãos da região Sudeste, sendo o sexto no Brasil. Minas Gerais apresentou uma produtividade média de grãos de 4.235 kg ha⁻¹, 1,4% maior que a safra 2016/2017 (CONAB, 2018). Segundo projeções SAEA (2017), no período de 2017 a 2027, o estado de Minas Gerais apresentará taxas de crescimento anual de 1,63% na produção de grãos. Estima-se que a área colhida atingirá 3,607 milhões de hectares, com produção de 16,834 milhões de toneladas em 2027. Atualmente as regiões do estado com maior produção de grãos, são o Noroeste de Minas, Triângulo, Alto Paranaíba, Campo das Vertentes e Sul de Minas.

Ressalta-se que nas regiões Sul de Minas e Campo das Vertentes houve o predomínio da monocultura de milho até o início dos anos 2000. Após esse período, houve a adoção de sistemas de produção com inclusão de rotação/sucessão de culturas com soja, feijão, trigo e aveia, as quais contribuíram para o aumento significativo das produtividades das culturas. Devido à heterogeneidade dos solos da região, associada à baixa infiltração de água, há a tendência ao voçorocamento (GOMIDE; SILVA; SOARES, 2011), isso mostra a grande importância do SPD na região, visando a conservação dos solos.

Com o desenvolvimento de cultivares de milho e soja precoces e adaptados às condições locais da região Campo das Vertentes, tem sido possível o cultivo de duas safras por ano, principalmente com rotação soja e milho na primavera/verão, em sucessão de trigo e

feijão no outono/inverno. Tem sido observado o cultivo de até três safras por ano em algumas glebas, quando se cultiva o milho na primavera/verão semeado cedo, em sucessão feijão verão/outono, e com uma terceira safra de trigo e/ou aveia após a colheita do feijão.

O aumento do número de cultivos por ano, eleva o tráfego de máquinas pesadas nas áreas, o que pode proporcionar o surgimento de solos com uma camada compactada. A camada compactada apresenta alteração no balanço de macro e microporos, e, conseqüentemente, da disponibilidade de água e oxigênio, apresentando menor área de solo explorada pelas raízes e formação de gradiente vertical de fertilidade (CAVALIERI et al., 2006; VALADÃO et al., 2014). Com isso, há redução no desenvolvimento de plantas, com menores incrementos de matéria orgânica, reduzindo a ciclagem de nutrientes e a atividade de microrganismos (HAMZA; ANDERSON, 2005).

Os equipamentos citados na literatura para o rompimento das camadas compactadas são os escarificadores (KLEIN; CAMARA, 2007; BELLÉ et al., 2014; GIRARDELLO et al., 2017) e subsoladores (RAPER et al., 2005; SEKI et al., 2015; MONTEIRO et al., 2017). Nem sempre a camada compactada está na profundidade que o escarificador alcança. Assim, a utilização de subsolador para operar em maiores profundidades deve ser avaliada, uma vez que tem sido utilizados subsoladores com hastes capazes de subsolar a profundidade de até 0,60 m. Deve ser ressaltado que há grande gasto de energia nessa operação, além do fato da camada compactada ser normalmente observada entre 0,20 e 0,40 m (SALVADOR; BENEZ; MION, 2008).

Com o intuito de romper a camada compactada e proporcionar a correção do perfil do solo, algumas empresas de implementos agrícolas vêm lançando subsoladores robustos, com caixa para distribuição de calcário. Assim, além de possibilitar melhoria na qualidade física do solo em áreas compactadas, também permite a aplicação localizada de calcário em profundidade. Em solos sob SPD estabilizados, não é desejável o revolvimento do solo para incorporação de calcário, sendo a correção da acidez realizada com aplicação de calcário na superfície do solo (CAIRES, 2013).

Embora já existam trabalhos relacionados aos efeitos das práticas mecânicas de revolvimento do solo nos seus diversos atributos e nas produtividades das culturas, ainda há muitas controvérsias nos resultados obtidos. Mesmo assim, há uma crescente adoção pelos produtores rurais, do uso de equipamentos para a subsolagem do solo. Diante disso, há necessidade de novos trabalhos com novos equipamentos e formas de manejo do solo.

No presente trabalho objetivou-se avaliar a prática da subsolagem, bem como a aplicação de corretivos em subsuperfície, visando a melhoria das condições químicas e físicas

do solo, e seus efeitos na produtividade das culturas em um sistema de produção com culturas anuais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistema de plantio direto

O SPD apresenta como pilares fundamentais para a produção sustentável, a construção da fertilidade do solo, antes da sua adoção, e a rotação/sucessão de culturas. Assim, o cultivo de uma safra sempre ocorre sobre os restos culturais de uma lavoura anterior. A palha na superfície do solo, além de ser reserva de nutrientes, auxilia na manutenção da umidade, aeração, temperatura e atividade macro e microbiológica do solo (OLIVEIRA et al., 1999; ANCÂNTARA et al., 2000; CALONEGO; FOLONI; ROSOLEM, 2005).

Com as práticas de rotação e sucessão de culturas e o não revolvimento do solo por implementos agrícolas (FIDELIS et al., 2003), ocorre aumento da macroporosidade nos solos (STONE; SILVEIRA, 2001). Esse fato está relacionado com a diversificação de formas de exploração exercida pelas raízes das plantas no perfil dos solos (CAIRES et al., 2001).

A rotação de culturas favorece a manutenção da fertilidade do solo, quebra o ciclo de pragas, doenças e plantas daninhas, proporcionando maior rentabilidade ao produtor pela diversificação do cultivo (FIDELIS et al., 2003). Práticas de rotação de culturas devem envolver, preferencialmente, diversidade de espécies (gramíneas e leguminosas) e de arquitetura radicular (fasciculada e pivotante), contribuindo para a ciclagem de nutrientes (RESENDE et al., 2016).

Para adoção do SPD, é necessário um bom cultivo convencional antes da sua implantação, preconizando-se a correção da acidez pela aplicação e incorporação do calcário aplicado em profundidade no solo. A utilização desta prática, juntamente com a de gessagem, vem sendo uma alternativa para elevar os teores de nutrientes no perfil do solo (CAIRES; JORIS; CHURKA, 2011; NORA et al., 2014).

Após a adoção do SPD em solos que necessitam da correção da acidez, é realizada pela aplicação de calcário na superfície, sem incorporação. A calagem superficial não apresenta efeito rápido na correção da acidez no perfil do solo, entretanto, ao longo dos anos pode-se corrigir da acidez no perfil do solo (CAIRES, 2013). A liberação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular na superfície do solo, é um dos principais mecanismos da correção da acidez do solo com aplicação de calcário em superfície no SPD (ROSOLEM et al., 2004; CAIRES et al., 2006).

Nos solos sob SPD de longa duração, com rotação de culturas e plantas de cobertura há maior produção da palhada, fortalecendo o tamponamento, resiliência e estabilidade nos

solos de fertilidade construída favorecendo o funcionamento do sistema (RESENDE et al., 2016). Apesar da dificuldade de elevar os teores de matéria orgânica (MO) nas regiões tropicais, a manutenção ou acréscimo aumenta a capacidade de reserva e suprimento de nutrientes pelo solo, vinculado a níveis mais elevados de fertilidade do solo, biomassa microbiana e produtividade de grãos (SÁ et al., 2015; CORBEELS et al., 2016).

Na prática, por outro lado, há relatos de produtores que adotam o SPD com problemas de compactação do solo. Muitas vezes, o problema pode ser causado pelo tráfego de máquinas pesadas, principalmente quando o solo ainda está muito úmido (GIRARDELLO et al., 2017). Sales et al. (2016) observaram que o SPD mantém a agregação do solo, mas pode causar compactação superficial, não alterando a disponibilidade de água no solo.

Solos sob SPD bem manejados, com mínimo revolvimento do solo, rotação de culturas e produção de palhada não apresentam limitações físicas de manejo (RESENDE et al., 2016). Os bioporos, criados pelas raízes das culturas anteriores e mesofauna do solo, proporcionam que raízes das culturas sucessoras penetrem camadas mais compactadas (ANDRADE; STONE; SILVEIRA, 2010). Silva et al. (2017) observaram que um Latossolo Vermelho manejado com milho como planta de cobertura apresentou menor densidade do solo e maior macroporosidade, evidenciando a ação do sistema radicular na formação de bioporos, após sua decomposição.

A adoção do SPD promove um sistema mais tamponado pela MO, reduzindo ação de processos erosivos pela proteção da palhada, minimizando a perda de nutrientes pela erosão, adsorção ou lixiviação. Favorece também a recirculação de nutrientes, pela ciclagem e estabilidade do sistema, proporcionando maior eficiência no uso da água, redução de custos, estabilidade produtiva e econômica, com melhoria das condições de vida do produtor (RESENDE et al., 2016).

2.2 Práticas corretivas nos atributos químicos do solo

Como o calcário apresenta baixa mobilidade no perfil do solo, associado a uma solubilidade limitada, antes da adoção do SPD, torna-se necessário uma adequada correção da acidez até as profundidades de 30 a 40 cm (MOREIRA et al., 2018). Caso a correção não seja adequada, haverá limitação do desenvolvimento das raízes das plantas, reduzindo a absorção de água e nutrientes (SILVA et al., 2009).

Em solos sob SPD já consolidados, a correção da acidez do solo é realizada com aplicação de calcário na superfície, sem incorporação (MOREIRA et al., 2001; CAIRES;

JORIS; CHURKA, 2011; PAULETTI et al., 2014). A longo prazo, solos sob SPD apresentam um gradiente de correção da acidez em direção ao subsolo. Em trabalhos de Caires et al. (2008), a aplicação de 6 t ha^{-1} de calcário proporcionou redução da acidez no perfil do solo de 0 a 60 cm, com aumento do pH e teores de Ca de 0 a 20 cm e redução dos níveis de alumínio tóxico até a profundidade de 60 cm, após 10 anos da aplicação.

A correção da acidez é mais restrita à camada superficial do solo, quando o calcário é aplicado em superfície sem incorporação, do que quando este é incorporado. Moreira et al. (2001) e Pauletti et al. (2014) verificaram que houve a correção da acidez apenas na camada superficial do solo, quando o calcário foi aplicado na superfície, sem incorporação, sendo que o efeito da correção da acidez no perfil pode estar relacionado a dose aplicada.

Após três anos da aplicação do calcário em superfície houve aumento do pH, dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e redução do Al^{3+} do solo até 10 cm de profundidade (CAIRES et al., 2006). Após seis anos da aplicação superficial de calcário em SPD, houve aumento do pH do solo, sendo efetiva na redução da acidez do solo até 20 cm profundidade. O teor de matéria orgânica do solo manteve-se inalterado ao longo do tempo, mas houve aumento da produtividade das culturas no sistema de produção de grãos (CAIRES et al., 2015).

Em outro estudo desenvolvido na região sudeste do Paraná, com a aplicação 15 t ha^{-1} de calcário em superfície, com ou sem incorporação, houve maior disponibilidade de água às plantas, devido ao aumento de micro e macroporosidade do solo. Houve também aumento do pH, precipitação Al^{3+} e substituição desse íon no complexo de troca por Ca^{2+} e Mg^{2+} até a profundidade de 20 cm (AULER; PIRES; CAIRES, 2017).

Para a avaliação do efeito da correção da acidez do solo em SPD, na produtividade das culturas e nos componentes químicos em camadas mais profundas, deve ser considerado o tempo após as práticas corretivas (PAULETTI et al., 2014). Algumas estratégias estão sendo utilizadas para mobilizar o calcário no perfil do solo, por meio de intervenções físicas com implementos, com uso de gesso e resíduos vegetais (SILVA et al., 2009).

Com o passar do tempo, o calcário adicionado na superfície do solo pode movimentar fisicamente, através dos canais formados pelas raízes mortas (SILVA et al., 2017). Também pode haver formação de pares iônicos com os ácidos orgânicos liberados pela decomposição da palhada, formando compostos com facilidade de movimentação no perfil (FRANCHINI et al., 1999).

O efeito da calagem com ou sem resíduos de plantas fica limitado a 10 cm de profundidade. A eficiência do resíduo de plantas na mobilidade do calcário segue a seguinte ordem aveia preta > centeio > mucuna > leucena (MIYAZAWA; PAVAN; FRANCHINI, 2002).

Em SPD, os maiores acúmulos de Ca e Mg ocorrem até 10 cm de profundidade e carbono orgânico até 20 cm de profundidade (BROWN et al., 2018). A aplicação de 4 t ha⁻¹ de calcário em superfície associado a plantas de cobertura, após um ano, movimentou Ca e Mg até 20 cm de profundidade (SILVEIRA et al., 2010).

Tem sido estudado o efeito do gesso aplicado de forma isolada ou em conjunto com o calcário na melhoria dos teores de Ca e Mg em profundidade (VITTI; PRIORI, 2010). A aplicação de 2,0 t ha⁻¹ de calcário, combinado com 5 t ha⁻¹ de gesso, possibilitou aumento de quase 10% na produtividade de milho comparado ao controle (NORA et al., 2014). O gesso aplicado na dose de 2 t ha⁻¹ pode aumentar os teores de Ca²⁺ redistribuir o Mg²⁺ até a profundidade de 40 cm, proporcionando incremento na produtividade de grãos de milho e soja (ZANDONÁ et al., 2015).

Rampim et al. (2011) verificaram que a aplicação de 5 t ha⁻¹ de gesso em SPD, em solos com ou sem Al trocável, proporcionou aumento dos teores de Ca²⁺ e SO₄²⁻ e movimentou o Mg²⁺ até 40 cm de profundidade. No entanto, com aplicação de gesso houve aumento dos teores de Ca e Mg nas folhas da soja e redução dos teores de Mg nas folhas do trigo. Os autores concluíram que houve a descida de K, Mg e Ca no perfil do solo.

O uso de 9 t ha⁻¹ gesso combinado com 4,5 t ha⁻¹ calcário, possibilitou melhoria nos atributos químicos no perfil, promovendo redução nos teores de Al³⁺, aumento de Ca²⁺ e não apresentou redução nos teores de Mg²⁺ bem como lixiviação de K⁺ (CAIRES; JORIS; CHURKA, 2011). A aplicação de 4,5 t ha⁻¹ de calcário em superfície combinado com 9 t ha⁻¹ de gesso provocou aumento no estoque de carbono orgânico total até 10 cm de profundidade. Dessa forma, essa combinação de calcário com gesso pode ser uma estratégia eficiente para melhorar a atividade biológica, os estoques carbono e a produtividade das culturas (INAGAKI et al., 2016).

Em SPD, é desejável a redistribuição em profundidade dos teores de cátions básicos, para evitar o impedimento químico ao crescimento das raízes e aumentar a resistência ao déficit hídrico. A aplicação de gesso reduz o teor de Al³⁺ na camada até 40 cm de profundidade (ZANDONÁ et al., 2015). A redução nos teores de Al³⁺ em decorrência da aplicação de gesso, ocorre pela precipitação do Al³⁺ (ADAMS; RAWAYFIH, 1977), na forma de pares iônicos ou complexo AlSO₄⁺ (PAVAN; BINGHAM; PRATT, 1984).

2.3 Crescimento radicular

Uma das formas de se avaliar a presença de compactação é pela avaliação do sistema radicular das culturas nas camadas inferiores do solo. Atualmente, tem sido desenvolvido metodologias para avaliar o crescimento de raízes em profundidade (JORGE; RODRIGUES, 2008), além da avaliação da atividade de raízes no perfil (ENCIDE-OLIBONE; OLIBONE; ROSOLEM, 2008).

O crescimento radicular no perfil do solo é afetado pela presença de Al tóxico e principalmente pelo impedimento físico. A causa direta do excesso de Al tóxico é o engrossamento das raízes nas camadas superficiais do solo e restrição do crescimento da parte aérea em situação de limitação de chuvas (CAIRES et al., 2001).

As raízes não apresentam bom desenvolvimento em solos ácidos devido ao excesso de Al e/ou deficiência de Ca. De maneira geral, o crescimento das raízes é prejudicado pela presença de Al tóxico às plantas (Al^{3+} e $AlOH^{2+}$) (CAIRES et al., 2001). Solos manejados adequadamente sob SPD, não têm apresentado restrição ao crescimento de raízes devido à falta de Ca e/ou Al tóxico (CAIRES, 2013). Além disso, parte do Al tóxico pode ser complexado por ligantes orgânicos (FRANCHINI et al., 1999).

Nas condições do Sul do Brasil, a acidez do solo limitou o crescimento radicular e a produção de trigo pela falta de água na fase do desenvolvimento vegetativo. A calagem superficial proporcionou aumento de 66% no crescimento radicular até 60 cm de profundidade e aumento de até 140% na produtividade de trigo (CAIRES et al., 2005). Nos estudos de Joris et al. (2013), a calagem aumentou a densidade e o comprimento das raízes, absorção de nutrientes e produção de milho e soja sob estresse hídrico, comparado aos locais sem aplicação de calcário.

Segundo Caires et al. (2001), o crescimento radicular da soja não foi afetado pelas condições de acidez do solo com 1,5, 1,2 e 0,8 $cmol_c\ dm^{-3}$ de Ca e 28, 32 e 40% de saturação por Al, nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-40 cm, respectivamente.

A concentração das raízes apenas na camada superficial do solo proporciona menores produtividade das culturas (BEUTLER; CENTURION; ROQUE, 2004; FREDDI et al., 2007). Com a correção da acidez do solo no perfil, as culturas apresentam maior desenvolvimento radicular, proporcionado maiores produtividades (CAIRES, 2013).

A acidez subsuperficial apresenta-se como fator determinante para o crescimento do sistema radicular, tendo grande importância para o aumento do reservatório de água disponível durante os períodos de estresse hídrico (FRANCHINI et al., 2008). Além disso, a

aplicação de calcário na superfície do solo, apresenta baixa eficiência na correção da acidez subsuperficial (CAIRES, 2013). Nesse sentido, Veronesse et al. (2012) observaram que plantas de cobertura associadas à calagem promoveram melhoria nos parâmetros de acidez do solo, quando a dose aplicada é maior ou igual que a recomendada para saturação por bases (V) de 50%.

Plantas de cobertura apresentam como função, a liberação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular, formando complexo orgânico com alumínio (Al), cálcio (Ca) e magnésio (Mg). Dessa forma, além de neutralizar o Al tóxico, esses ácidos podem aumentar a mobilidade de Ca e Mg no perfil do solo (AMARAL; ANGHINONI; DESCHAMPS, 2004). A calagem com resíduos de aveia preta e nabo forrageiro, promoveu o aumento do pH e o teor de Ca, reduzindo o teor de Al na camada de 0 a 20 cm de profundidade (FRANCHINI et al., 2001).

O crescimento das raízes acompanha os efeitos químicos do solo, sendo favorável ao gradiente de correção da acidez, e após nove anos da calagem em superfície com dose de 3 ton ha⁻¹ aumentou os teores de pH e Ca e reduziu os teores de Al até 60 cm de profundidade (CAIRES et al., 2008). Franchini et al. (2001) observaram que a prática da calagem em superfície sem resíduo vegetal promoveu crescimento de raízes de trigo até 10 cm de profundidade, enquanto a calagem em superfície com resíduos de aveia e nabo favoreceu o crescimento das raízes até 20 cm de profundidade.

A manutenção da palhada proporciona melhores condições de umidade no solo, favorecendo o desenvolvimento radicular das culturas (FERREIRA; LÚCIO; CARGNELUTTI FILHO, 2012). A aplicação superficial de calcário sobre palhada de aveia preta não provocou aumentos no crescimento de raiz de milho e soja (CAIRES et al., 2008). Girardello et al. (2017) acrescentam que o menor crescimento do sistema radicular das culturas, inviabiliza o acesso a um maior volume de água e nutrientes em períodos de veranicos.

Plantas de sistema radicular robusto (braquiárias e milheto) contribuem para mobilização de nutrientes, recuperando aqueles deslocados para zonas inferiores (K, S, B) e auxilia a incorporação de outros menos móveis (P e Ca), além de aportar carbono e agregar os benefícios da matéria orgânica do solo em camadas mais profundas (RESENDE et al., 2016).

Além da acidez, a restrição física pode apresentar como principal fator de impedimento ao crescimento radicular (FREDDI et al., 2007). A resistência do solo à penetração superior a 1,3 MPa afeta o desenvolvimento do sistema radicular no perfil (GUIMARÃES; STONE; MOREIRA, 2002; VALADÃO et al., 2014). Isso porque reduz a

macroporosidade do solo, a qual apresenta como indicador para a restrição do crescimento radicular do milho (BERGAMIM et al., 2010).

Diagnósticos qualitativos como a distribuição das raízes no perfil do solo, e quantitativos como o grau de acidez no perfil do solo, apresentam-se como ferramentas para auxílio na verificação da qualidade do manejo adotado e no estabelecimento de limites de acidez, que não afetam o desenvolvimento radicular das plantas em sistemas de produção de grãos (FREDDI et al., 2007).

2.4 Resistência do solo à penetração e atributos físicos do solo

O desenvolvimento radicular é afetado pela resistência mecânica do solo e altera o potencial de produção das culturas. Devido ao maior número de cultivos por ano, aumentou-se o tráfego de máquinas pesadas, o que pode aumentar a resistência à penetração (RP). A prática de intervenção mecânica para rompimento da camada compactada, muitas vezes é realizada sem critério técnico.

A RP é um dos fatores mais importantes no alongamento radicular das culturas no perfil do solo. Bengough e Mullins (1990) concluíram que os penetrômetros são os equipamentos mais adequados para prever a resistência à penetração das raízes. Por outro lado, a conveniência em mensurar a RP com o uso de penetrômetros, pode superestimar a resistência para o crescimento radicular (PEDROTTI et al., 2001). O alongamento da raiz no solo pode ser limitado pela RP e estresse hídrico (BENGOUGH et al., 2011). Molin, Dias e Carbonera (2012), ao avaliarem diferentes tipos de penetrômetros, com diferentes princípios de funcionamento, verificaram que a partir de 15 repetições é possível avaliar a RP com menor variação.

Em um Latossolo Vermelho distoférrico sob SPD, a RP teve grande variação temporal e foi associada à variação do teor de água para cada condição de densidade do solo ou estado de compactação. Durante o ciclo das culturas, valores de RP restritivos ao crescimento das plantas foram atingidos na camada de cerca de 3 a 23 cm de profundidade (GENERO JUNIOR; REINERT; REICHERT, 2004).

Segundo Rodrigues da Silva, Reichert e Reinert (2004), a variabilidade espacial da RP diminui da área de cabeceira para o centro da lavoura, sendo que os valores de RP variam também entre as ordens de solos, pois em Argissolos, os valores críticos de RP variam entre 1,19 MPa e 1,5 MPa; em Latossolos Vermelho distrófico, os valores críticos podem variar entre 2,1 MPa à 3,2 Mpa. Solos sob SPD apresentam valores mais elevados de RP até 20 cm

de profundidade, comparado a solos sob sistema convencional. Solos cultivados com sistema de produção com rotação de culturas azevém/feijão, aveia/soja, ervilhaca/milho apresentam maiores valores de RP comparados ao sistema de produção com sucessão ervilhaca/milho (TEIXEIRA; PAULETO; DA SILVA, 2003).

A compactação do solo proporciona mudanças no sistema poroso (ARAUJO; TORMENA; SILVA, 2004), nos solos sob cultivo convencional, há valores maiores de densidade do solo e menores de macroporosidade e porosidade total. A produtividade de soja apresenta correlação positivas da macroporosidade e porosidade total (BEUTLER; CENTURION, ROQUE, 2004).

Os atributos físicos do solo podem ser classificados como diretamente relacionados ao crescimento das plantas, água, oxigênio, temperatura e RP, e relacionados ao crescimento das raízes densidade do solo, porosidade, infiltração de água, agregação e textura (LETEY, 1985). A seleção de atributos físicos deve ser sensíveis ao manejo e produção das culturas, além do monitoramento da qualidade do solo (BEUTLER; CENTURION; ROQUE, 2004).

Solos sob SPD podem apresentar maior crescimento radicular devido à presença de poro contínuo, criado por minhocas e raízes de culturas anteriores. Esses bioporos ocupam menos que 1% do volume do solo, podendo ser utilizado por raízes de culturas subsequentes como passagem para o desenvolvimento radicular (EHLERS et al., 1983). Os pelos radiculares nas pontas das raízes apresentam como função potencial de ancoragem mecânica, para as raízes que crescem em bioporos (BENGOUGH et al., 2011).

2.5 Utilização de subsoladores

Em sistemas de produção intensificados, um dos principais desafios é a manutenção da adequada estrutura e aeração do solo. Uma forma de suprir a demanda de oxigênio para as raízes é por meio de práticas de escarificação e subsolagem, pelo rompimento da camada compactada. Para recomendação dessa prática devem avaliados os níveis de compactação do solo (SEKI et al., 2015).

Em SPD, uma das principais causas da compactação dos solos é o tráfego de máquinas ocasionado pela redução das janelas de semeadura e intensificação do sistema de produção, em operações de semeadura, tratos culturais e colheita (FREDDI et al., 2007; BELLÉ et al., 2014). O problema aumenta quando as operações são realizadas em solos em condições de muita umidade e com pouca palha na superfície (GIRARDELLO et al., 2017). O tráfego de máquinas pesadas pode promover a compactação superficial desses solos, sendo observados

aumentos prejudiciais para as plantas, principalmente até 20 cm de profundidade (BERGAMIM et al., 2010).

Os solos argilosos são mais suscetíveis à compactação quando comparados a solos com a textura arenosa (SECCO et al., 2009). Em solos compactados, há decréscimo da macroporosidade, da disponibilidade de água e da absorção de nutrientes. Como consequência, há redução na difusão de gases no solo, limitando os processos metabólicos das plantas (BEUTLER; CENTURION; ROQUE, 2004; BERGAMIM et al., 2010).

Quando é identificada a compactação do solo, recomenda-se utilizar um sistema de manejo que possibilite romper a camada compactada. A escarificação proporciona redução da resistência do solo à penetração, com pouca mobilização do solo. Quando a camada compactada está em profundidades não atingidas pelos escarificadores, a subsolagem é recomendada para o rompimento dessa camada (SEKI et al., 2015).

A utilização de escarificadores em SPD vêm sendo indicados para romper camadas compactadas até 0,20 m. Entretanto, a eficiência desta prática em solos sob SPD tem sido questionada. Girardello et al. (2014) avaliaram a eficiência de escarificadores e observaram uma diminuição nos valores de RP, comparado aos locais sem escarificação. Nas parcelas em que não realizou a escarificação, o valor da RP foi de 1,36 MPa, e de 1,75 MPa onde teve o tráfego de tratores, sem escarificação. Bellé et al. (2014) relatam que, em solos com a utilização de escarificador, há menor consumo de combustível, potência e tração do trator do que em locais sem uso de escarificador.

O uso de subsoladores vem sendo indicado para romper camadas compactadas em profundidades acima de 0,20 m. Monteiro et al. (2017) relatam que, com a utilização de subsoladores, há o rompimento das camadas compactadas até 0,30 m. A subsolagem é uma prática que corrige e mobiliza o solo em subsuperfície tendo como vantagem o não revolvimento do solo, sendo indicado para áreas sob SPD.

Seki et al. (2015) avaliaram o efeito de escarificadores e subsoladores em solos sob SPD. Observaram que a utilização do escarificador proporcionou maior manutenção da cobertura vegetal do solo do que os subsoladores. No entanto, Nunes et al. (2015) concluíram que a utilização de semeadoras adaptadas ao SPD, podem descompactar o solo até a profundidade de 0,17 m.

A prática da subsolagem em solos sob SPD, pode ser uma operação com alto custo e com baixo rendimento operacional. Raper et al. (2005) observaram que solos onde foi realizada a subsolagem, não apresentam diferença na produtividade de culturas, em comparação com solos manejados sem subsolagem, sob SPD.

Vários autores relatam que não foram apresentados incrementos na produtividade das culturas, após a prática da escarificação ou da subsolagem em solos compactados (BEUTLER; CENTURION; ROQUE, 2004; RAPER et al., 2005). Em Latossolos e Argissolos oxídicos, sob SPD, a escarificação e subsolagem apresentam como operações desnecessárias, pois em longo prazo, a qualidade física do solo pode ser melhorada com a prática de rotação e sucessão de culturas (SILVA et al., 2012). Girardello et al. (2014), avaliando a eficiência de escarificadores verificaram que a produtividade da soja em área escarificada foi de 3.669 kg.ha⁻¹, sendo semelhante a área sem escarificação. Andrade Junior et al. (2014) observaram que os sistemas de preparo de solo, cultivo mínimo com subsolagem e SPD, com espaçamento de plantio de 0,40 m proporcionam aumento na produtividade de milho.

Para proporcionar efeito duradouro das práticas de escarificação e subsolagem sob SPD, deve-se implantar gramíneas forrageiras após a prática da intervenção mecânica, permitindo que as raízes ocupem os espaços deixados pelas hastes dos equipamentos, a fim de que possam formar poros contínuos, melhorando a capacidade de suporte de carga do solo (BERGAMIN, 2018).

Apesar de trabalhos mais antigos terem mostrado pouco efeito no uso de escarificação e subsolagem na produtividade das culturas, atualmente, em muitos sistemas de cultivo, o tráfego de máquinas aumentou, devido a adoção de dois ou três cultivos por ano na mesma área. Além disso, os produtores têm utilizado máquinas com maior rendimento operacional e, portanto, mais pesadas, e também devido ao maior número de entrada nas áreas para manejo de doenças, plantas daninhas e pragas, visando atingir maiores produtividades. Na soja, há situações em que o produtor tem feito de oito a dez pulverizações por ciclo da cultura. Dessa forma, novas avaliações devem ser realizadas para diferentes condições edafoclimáticas e regiões de produção do país.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área experimental e ensaio de campo

O estudo foi realizado na Fazenda Santa Helena, situada a 21°15'40" S e 44°30'30" O, a 1020 m de altitude, no município de Nazareno, na mesorregião Campo das Vertentes de Minas Gerais. O clima da região segundo classificação de Köeppen, é do tipo CWa, com verões quentes e úmidos e invernos frios e secos. A Figura 1 apresenta a distribuição pluviométrica, coletada na estação meteorológica instalada na propriedade, durante o período de estudo.

O experimento foi instalado em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico A fraco/moderado textura argilosa em transição com um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico A fraco/moderado textura argilosa; ambos fase cerrado, relevo plano e suave ondulado (FEMA, 2010), cultivado em SPD há cerca de 10 anos (TABELA 1)

O trabalho foi iniciado na safra 2015/16 e conduzido durante quatro anos com sete safras agrícolas. O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizados, com 5 tratamentos e 4 repetições. Cada parcela do experimento apresenta dimensões de 18 metros de largura por 20 metros de comprimento. A largura de 18 metros corresponde a duas passadas da semeadora de grãos da fazenda. As operações de manejo de plantas daninhas, doenças e pragas no experimento são iguais às adotadas pelo produtor. A análise de solo da camada de 0-20 cm de profundidade, antes da instalação do experimento está descrita na Tabela 2.

Durante a safra 2015/16 foram cultivados soja (*Glycine max* (L.) Merrill) cv. VTOP convencional na primavera/verão, semeada em 11/11/2015 e colhida em 08/03/2016, com precipitação de 1145 mm, e trigo (*Triticum* spp. L.) cv. BRS 264 no outono/inverno semeado em 01/04/2016 e colhido em 07/08/2016, com precipitação de 117 mm. O manejo de adubação das culturas foi realizado com base na análise de solo da área e também nas quantidades de nutrientes exportados por cada cultura. Na safra 2015/2016, durante o cultivo primavera/verão, as sementes foram inoculadas com estirpes selecionadas de *Bradyrhizobium*, em meio líquido e turfoso. Na safra primavera/verão foram aplicados 12 e 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e K₂O, respectivamente. No cultivo de outono/inverno foram aplicados 82, 94 e 38 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente.

Na safra 2016/17 foram cultivados milho (*Zea mays* L.), híbrido DKB 230 PRO3 na primavera/verão semeado em 06/10/2016 e colhido em 30/01/2017, com precipitação de 798 mm, e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. IPR Tuiuiú no outono/inverno semeado em

07/02/2017 e colhido em 20/05/2017, com precipitação de 370 mm. Durante o cultivo primavera/verão foram aplicados 278; 78 e 120 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅e K₂O, respectivamente. No cultivo de outono/inverno foram aplicados 140 e 69 kg ha⁻¹ de N e P₂O₅, respectivamente.

Na safra 2017/18 foram cultivados soja cv. Monsoy 5917 IPRO na primavera/verão, semeada em 30/10/2017 e colhida em 27/03/2018, com precipitação de 1092 mm, e trigo cv. BRS 264 no outono/inverno semeado em 03/04/2018 e colhido em 27/07/2018, com precipitação de 32 mm. Na safra 2017/18, durante o cultivo primavera/verão, as sementes foram inoculadas estirpes selecionadas de *Bradyrhizobium*, em meio líquido e turfoso. Aplicou-se 18, 92 e 150 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅e K₂O, respectivamente. No cultivo de outono/inverno foram aplicados 63 e 38 kg ha⁻¹de N e P₂O₅, respectivamente.

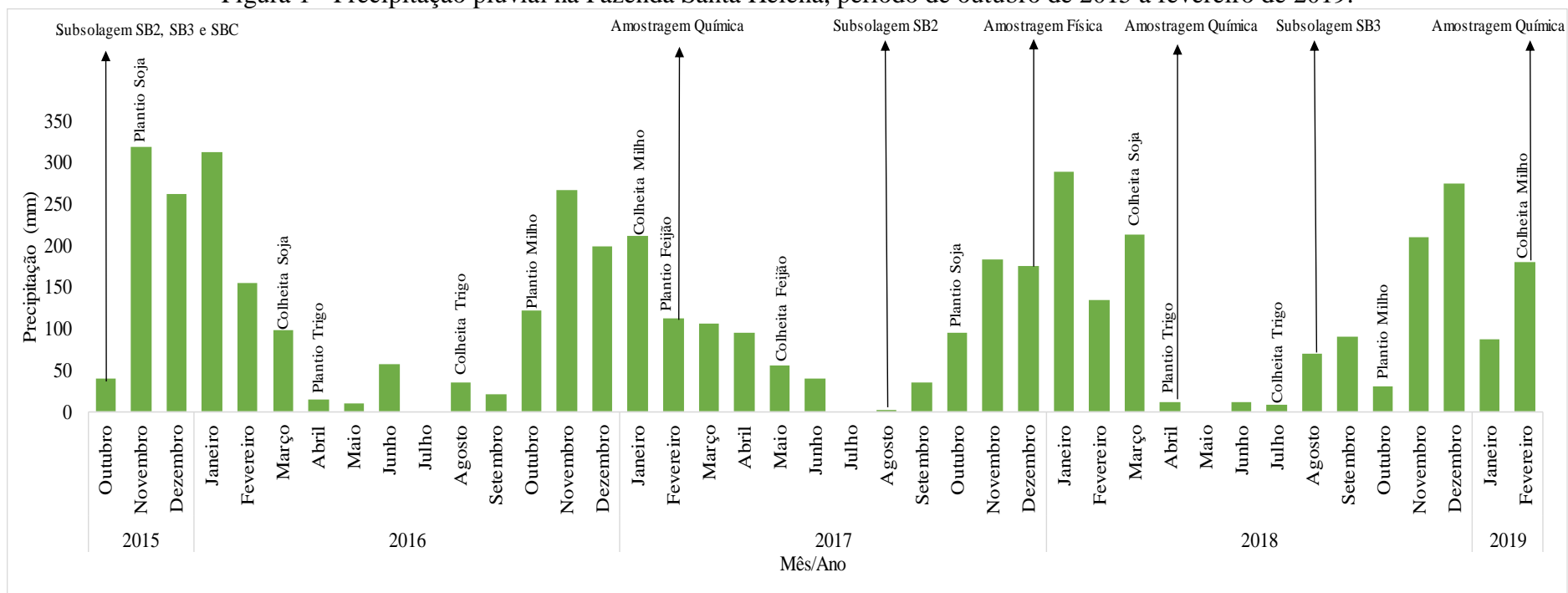
Na safra 2018/19 foi cultivado milho (*Zea mays* L.), híbrido DKB 230 PRO3 na primavera/verão, semeado em 05/10/2018 e colhido em 13/02/2019, com precipitação de 783 mm. Foram aplicados 248;65 e 87 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente.

Nos quatro tratamentos, variou o tipo de equipamento e o tempo de repetição da subsolagem e aplicação de calcário e gesso sendo descritos na Tabela 2. Após dois e três anos de cultivo, em agosto de 2017 e 2018, foi realizado a subsolagem nos tratamentos SB2 e SB3 respectivamente.

O equipamento utilizado nos tratamentos SB2 e SB3 é um descompactador Tandem da Ikeda[®] com hastes alada em aço de alto carbono, roda de profundidade associada ao disco de corte da palha, com profundidade de corte de 50 cm, e rolo nivelador para acabamento homogêneo. É um equipamento do tipo arraste com 4 hastes espaçadas a 0,5 m e largura de trabalho de 2,1 m.

O adubador de perfil Sak da Kamaq[®], é recomendado pela empresa para a correção do solo em profundidade, visando o manejo físico e químico do solo. Possui haste em profundidade que possibilita o enterrio de calcário até 65 cm e o rolo nivelador, para nivelamento do terreno. O equipamento possui quatro hastes, espaçadas a 50 cm com acionamento hidráulico, sendo um equipamento de arrasto, com capacidade de carga de corretivo de 2.500 quilos e largura de trabalho de 4,6 m.

Figura 1 - Precipitação pluvial na Fazenda Santa Helena, período de outubro de 2015 a fevereiro de 2019.



Fonte: Estação Meteorológica da Fazenda Santa Helena, Nazareno, MG.

Tabela 1- Histórico de cultivo e fertilização da área experimental de 2009 a 2015.

Safr	Cultura	Época	Fertilização				
			Calcário	Gesso	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
			----- kg ha ⁻¹ -----				
2009/10	Soja	Primavera/Verão	6000	2500	-	-	-
	Pousio	Outono/Inverno	-	-	-	-	-
2010/11	Soja	Primavera/Verão	-	-	8	74	38
	Milho	Outono/Inverno	-	-	58	37	134
2011/12	Milho	Primavera/Verão	-	-	194	118	130
	Pousio	Outono/Inverno	-	-	-	-	-
2012/13	Soja	Primavera/Verão	-	1084	25	125	81
	Milho	Outono/Inverno	-	-	104	85	54
2013/14	Soja	Primavera/Verão	-	1690	19	99	143
	Trigo	Outono/Inverno	-	-	128	98	79
2014/15	Milho	Primavera/Verão	-	-	226	12	-
	Pousio	Outono/Inverno	-	-	-	-	-

Fonte: Fazenda Santa Helena.

Tabela 2 - Atributos químicos do solo coletados na área experimental no início do experimento.

Prof. (cm)	pH	K	P ¹	S	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	T	V	MO	Areia	Argila	Silte
	CaCl ₂	- mg	dm ⁻³	-	-----	cmol _c dm ⁻³	-----	-----	-----	-----	%	-----	g	kg ⁻¹	-----
0 a 20	4,8	168	55	16	2,2	0,6	0	3,9	3,2	7,1	45	27	20	59	21

K = potássio, P = fósforo, S = enxofre, Ca = cálcio, Mg = magnésio, Al = alumínio, H+Al = poder tampão, SB = soma de bases, T = capacidade de troca de cátions potencial, V = saturação por base, MO = matéria orgânica do solo, ¹ extrator utilizado Resina.

Fonte: Do autor (2019).

Tabela 3 - Descrição dos tratamentos utilizados no experimento.

Tratamento	Descrição
SPD	Controle sob SPD e sem subsolagem
SB2	Subsolagem profunda com equipamento Tandemda Ikeda [®] a 0,50 m de profundidade, a cada dois anos
SB3	Subsolagem profunda com equipamento Tandem da Ikeda [®] a 0,50 m de profundidade, a cada três anos
SBC	Subsolagem profunda com Sak da Kamaq [®] a 0,60 m de profundidade, com aplicação de 1440 kg ha ⁻¹ de calcário (30% de MgO, 60% de CaO, PRNT de 175% e PN de 183%).

Fonte: Do autor (2019).

3.2 Avaliação dos atributos químicos

Após a colheita das culturas de primavera/verão das safras 2016/17, 2017/18 e 2018/19, foi realizada a amostragem de solo nas camadas de 0 a 20; 21 a 40 e 41 a 60 cm, por meio de um trado holandês. Foi realizada a caracterização dos atributos químicos, conforme metodologia descrita pela EMBRAPA (2011). Foram avaliados os seguintes atributos químicos: pH, Ca, Mg, Al, acidez potencial (H+Al), CTC potencial (T), matéria orgânica (MO) e saturação por bases (V%).

3.3 Avaliação dos atributos físicos

A coleta das amostras foi realizada em 27 de dezembro de 2017, durante a safra 2017/18, nas profundidades 0 a 5; 20 a 25; 30 a 35 e 35 a 50 cm. As amostras foram preparadas em laboratório, com o volume de solo igual ao volume do cilindro, saturadas e submetidas ao potencial matricial de -6 kPa, em mesa de tensão modelo Ecotek[®] e após equilíbrio foram pesadas. Na sequência foram equilibradas a -10 kPa e novamente pesadas e submetidas ao teste de resistência à penetração. Para isso, utilizou-se o penetrômetro eletrônico de bancada, modelo MA 933, da marca MARCONI, com velocidade de penetração de 10 mm min⁻¹ e sistema de registro de dados, conforme metodologia descrita por Tormena

et al. (2007). Foram coletadas amostras de solo indeformado em anéis volumétricos, medindo 2,5 cm de altura por 5,6 cm de diâmetro, com volume de 61,6 cm³.

Foram determinados os seguintes atributos físicos do solo: densidade do solo (Ds) pelo método do cilindro volumétrico (GROSSMAN; REINSCH, 2002), porosidade total (PT; $PT=(1-(Ds/Dp))$) em que a densidade de partículas (Dp) foi obtida utilizando-se o método do balão volumétrico (FLINT; FLINT, 2002); microporosidade (Mic) pelo conteúdo de água à -6 kPa; e macroporosidade (Mac; $Mac=PT-Mic$); a capacidade de campo estimada pela umidade em equilíbrio à -10 kPa (SILVA et al., 2015) e capacidade de campo relativa (RFC) conforme Reynolds et al. (2008).

3.4 Avaliação da produtividade das culturas

A produtividade da soja, milho e feijão foi estimada pela colheita das plantas em 9 m² (três linhas com espaçamento de 60 cm e cinco metros de comprimento) de cada unidade experimental. Para estimação da produtividade do trigo foi utilizada uma área útil de 4,25 m² (cinco linhas com espaçamento de 17 cm e cinco metros de comprimento) de cada unidade experimental. Após a colheita, realizou-se a trilha, a pesagem e a retirada de impurezas dos grãos, a correção da umidade para 13% e a transformação dos resultados para kg ha⁻¹.

3.5 Análise estatística

Os dados foram analisados em delineamento inteiramente casualizado, considerando as parcelas coletadas aleatoriamente (independentes) dentro de cada tratamento como repetições (pseudorepetições) (FERREIRA; LÚCIO; CARGNELUTTI FILHO, 2012; CECAGNO et al., 2016), uma vez que apenas um bloco experimental foi utilizado. Para os atributos químicos, os tratamentos foram distribuídos em esquema de parcelas subdivididas, com as formas de descompactação nas parcelas, a profundidade nas subparcelas e ano nas subsubparcelas. Para produtividade das culturas foram considerados os tratamentos. Foi realizada análise de variância pelo teste F para avaliar o efeito dos tratamentos sobre as variáveis analisadas. Posteriormente, para comparação de médias dos tratamentos, utilizou-se o teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

3.6 Relação entre os atributos químicos, físicos e produtividade

Para identificar quais os atributos químicos e físicos do solo de maior resposta às alterações químicas e estruturais do solo, provocadas pelos tratamentos que provocaram impacto na produtividade das culturas, foram utilizadas análises de correlação linear de Pearson ($p < 0.05$). Para avaliar o grau de relação linear entre os atributos químicos e produtividade foram utilizadas as safras 2016/17, 2017/18 e 2018/19, de milho, soja e milho respectivamente. Para os atributos físicos e produtividade foi considerada a safra de soja 2017/18, a fim de identificar isoladamente qual atributo melhor se relacionou com a produtividade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.7 Atributos químicos

Houve interação dupla entre tratamentos e os anos de amostragem de solo (2017, 2018 e 2019) para os atributos pH, Ca, H+Al, T, MO e V, dessa forma, os resultados apresentados para os atributos citados são as médias das três profundidades (0 a 20; 20 a 40 e 40 a 60 cm), pois não houve interação entre tratamentos, profundidades e épocas de amostragens (TABELA 3). No entanto, houve interação entre tratamentos e profundidades. Dessa forma, os resultados apresentados são referentes às médias das três épocas de amostragem, em função dos tratamentos e profundidades, para os atributos Ca, Mg, H+Al, T, MO e V (TABELA 4).

Nas parcelas com revolvimento do solo, os valores de pH não variaram com os tratamentos após os três anos de avaliação (TABELA 3). Por outro lado, no solo sem revolvimento (SPD), os valores de pH reduziram já a partir do segundo ano de cultivo. Em solos cultivados sob SPD é comum observar redução dos valores de pH em locais com cultivo intensivo de gramíneas e com utilização de altas doses de nitrogênio, como observado por Grove e Blevins (1988), Tarkalson et al. (2006) e Martínez et al. (2016).

A redução dos valores de pH acontece devido a liberação de H⁺, durante o processo de nitrificação, em que o íon NH₄⁺ das fontes nitrogenadas é convertido a nitrato (GROVE; BLEVINS, 1988; EDWARDS et al., 1992; REEVES; LIEBIG, 2016). Como não há revolvimento nos solos sob SPD, todo o H⁺ liberado é concentrado nas camadas superficiais do solo. No presente trabalho, a redução dos valores de pH ocorreu depois de dois cultivos seguidos de gramíneas (milho e trigo), com a utilização de 311 kg ha⁻¹ de N.

Na média dos tratamentos, os teores de Ca e Mg, reduziram durante o período de avaliação (TABELA 3). Vale ressaltar, que os teores de Mg da camada de 0 a 20 cm (TABELA 4), encontram-se abaixo do nível crítico de 0,6 a 1,0 cmol_c dm⁻³, considerado adequado para áreas sob SPD, de acordo com Resende et al. (2016). Por sua vez, os teores de Ca da camada de 0 a 20 cm, quase sempre, estiveram dentro da faixa de 2,1 a 4,0 cmol_c dm⁻³, considerada adequada por Resende et al. (2016). A partir de dois anos do enterrio de calcário em profundidade (SBC), foi possível verificar efeito na elevação dos teores de Ca e Mg, ao solo sob SPD. Em solos sob SPD tem sido relatado maiores teores de Ca e Mg até 10 cm de profundidade (CAIRES; JORIS; CHURKA, 2011; CAIRES et al., 2005; CAIRES et al., 2008). No entanto, nesse trabalho; a avaliação considerou a camada de 0 a 20 cm. Na média,

os maiores valores de Ca e Mg foram observados na camada de 0 a 20 cm, fato já esperado, por ser a primeira camada atingida pelas correções dos solos. No entanto, não houve diferença nas profundidades avaliadas, em função dos tratamentos (TABELA 4).

Tabela 4 - Valores de pH, Ca, Mg, H+Al, T, MO e V do Latossolo Vermelho amarelo, considerando as formas de descompactação do solo durante os anos 2017, 2018 e 2019 (médias das profundidades de 0 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm).

Tratamento	Ano																										
	2017			2018			2019			2017			2018			2019											
	pH CaCl ₂						Ca						Mg						H+Al								
													cmol _c dm ⁻³														
SPD	5,2	Aa	4,8	Bab	4,6	Cc	2,0	Aa	1,4	Bb	0,9	Cb	0,5	Aa	0,3	Bb	0,2	Bb	2,9	Ac	3,2	Aab	2,8	Aa			
SB2	5,0	Aa	4,8	Ab	4,9	Ab	2,1	Aa	1,5	Bab	1,5	Ba	0,5	Aa	0,3	Bab	0,3	Bb	3,4	Ab	2,7	Bbc	2,2	Cac			
SB3	4,6	Ab	4,6	Ab	4,6	Abc	1,2	Ab	0,9	Ac	1,0	Ab	0,3	Ab	0,2	Ab	0,2	Ab	4,3	Aa	3,3	Ba	2,5	Cab			
SBC	5,1	Aa	5,2	Aa	5,3	Aa	1,9	Aa	1,9	Aa	1,6	Aa	0,5	Aa	0,4	Aa	0,5	Aa	2,9	Abc	2,4	Bc	2,0	Cc			
Média	5,0	A	4,9	A	4,8	A	1,8	A	1,4	B	1,3	B	0,4	A	0,3	B	0,3	B	3,4	A	2,9	B	2,4	C			
C.V. (%)	6,1						7,4						2,6						7,3								
	2017			2018			2019			2017			2018			2019			2017			2018			2019		
	T									MO									V								
	cmol _c dm ⁻³									g kg ⁻¹									%								
SPD	5,6	Aab	4,9	Ba	4,1	Ca	26	Aab	22	Ba	27	Aab	46	Aa	35	Bb	32	Bb									
SB2	6,2	Aa	4,7	Ba	4,3	Ba	27	Aab	24	Aa	24	Aa	45	Aa	40	Ab	45	Aa									
SB3	6,0	Aab	4,5	Ba	3,9	Ca	27	Aa	22	Ba	29	Aa	29	ABb	27	Bc	34	Ab									
SBC	5,5	Ab	4,9	Aa	4,2	Ba	24	ABb	23	Ba	26	Aab	46	Aa	49	Aa	53	Aa									
Média	5,8	A	4,8	B	4,1	C	26	A	23	B	27	A	42	A	38	B	41	AB									
C.V. (%)	7,9									8,9									7,2								

SPD = sistema de plantio direto, SB2 = subsolagem profunda a cada dois anos, SB3 = subsolagem profunda a cada três anos, SBC = subsolagem profunda com enterrio de 1440 kg ha⁻¹ de calcário (30% de MgO, 60% de CaO, PRNT de 175% e PN de 183%), CV = coeficiente de variação, Ca = cálcio, H+Al = poder tampão, T = capacidade de troca de cátions, MO = matéria orgânica, V = saturação por bases e C.V. = coeficiente de variação. Médias seguidas de letras distintas, minúsculas na coluna comparam os tratamentos e maiúsculas na linha comparam os anos, diferem entre si, pelo teste de Tukey, no nível de $\alpha=0,05$.

Fonte: Do autor (2019).

Ao avaliar a acidez potencial do solo (H+Al), observou-se que nos três anos de amostragens houve, de forma geral, redução nos valores, fato não esperado (TABELA 5). Após 2,5 anos da aplicação superficial de calcário, até 10 cm de profundidade não foi possível observar teores de Al tóxicos às plantas (CAIRES et al., 2005). Geralmente, observou-se redução da acidez potencial pelo efeito do enterrio do calcário no tratamento (SBC) durante os três anos avaliados como observado por Caires, Joris e Churka (2011), em que houve o efeito do calcário na correção do Al tóxico com a incorporação do corretivo ao solo. Não era esperado que os tratamentos onde não foi aplicado calcário apresentassem redução nos valores de H+Al, podendo esse fato estar associado ao efeito tampão do solo, o qual já se encontra em SPD desde 2009.

Tabela 5 - Valores de Ca, Mg, H+Al, T, MO e V do Latossolo Vermelho amarelo médias dos anos 2017, 2018 e 2019, considerando as formas de descompactação do solo nas profundidades de 0 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm (médias de 2017, 2018 e 2019).

Tratamentos	Profundidade (cm)								
	0-20	20-40	40-60	0-20	20-40	40-60	0-20	20-40	40-60
	Ca			Mg			H+Al		
	----- cmol _c dm ⁻³ -----								

SPD	2,1	1,2	1,0	0,4	0,3	0,3	3,1	3,1	2,6
SB2	2,3	1,6	1,3	0,5	0,3	0,3	3,1	2,7	2,6
SB3	1,4	0,9	0,7	0,3	0,2	0,2	4,0	3,3	2,9
SBC	2,5	1,7	1,2	0,6	0,5	0,4	2,7	2,4	2,2
Média	2,1A	1,4B	1,1C	0,4A	0,3B	0,3C	3,2A	2,9AB	2,5B
C.V. (%)	7,4			2,6			7,3		
	T			MO			V		
	----- cmol _c dm ⁻³ -----			----- g kg ⁻¹ -----			----- % -----		

SPD	5,8	4,9	4,0	29	25	21	45	34	34
SB2	6,2	4,8	4,3	30	24	22	49	43	38
SB3	5,9	4,6	3,9	30	25	22	33	30	27
SBC	5,9	4,7	3,9	30	23	20	54	48	45
Média	5,9A	4,7 A	4,0 B	30A	24B	21C	45A	39B	36B
C.V. (%)	7,9			8,9			7,2		

SPD = sistema de plantio direto, SB2 = subsolagem profunda a cada dois anos, SB3 = subsolagem profunda a cada três anos, SBC = subsolagem profunda com enterrio de 1440 kg ha⁻¹ de calcário (30% de MgO, 60% de CaO, PRNT de 175% e PN de 183%), Ca = cálcio, Mg = magnésio, H+Al = poder tampão, T = capacidade de troca de cátions, MO = matéria orgânica, V = saturação por bases e C.V. = coeficiente de variação. Médias seguidas de letras distintas, maiúsculas na linha comparam as profundidades, diferem entre si, pelo teste de Tukey, no nível de $\alpha=0,05$.

Fonte: Do autor (2019).

Quanto a variável T, foi possível verificar uma redução nos valores durante os anos, fato que não era esperado. No entanto, os valores de T são obtidos de forma indireta pelo somatório dos valores de Ca, Mg, K e H+Al. Dessa forma, as reduções observadas nos valores de Ca, Mg e H+Al poderiam explicar os menores valores de T observados nos últimos anos de avaliação (TABELA 5).

Na média das profundidades (0 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm), os valores de V% foram maiores no tratamento com enterrio de calcário (SBC), comparado ao SPD, após dois anos da aplicação do corretivo (TABELA 5). Na média dos anos e dos tratamentos, o valor médio de V% foi de 45%, na camada de 0 a 20 cm indicando a necessidade de correção. Segundo Caires (2013), deve ser considerada a aplicação de calcário para correção da acidez em solos sob SPD, com saturação por bases inferior a 65% na camada superficial.

Para a MO foi possível observar uma oscilação dos valores durante os anos de avaliação. Os menores valores observados em 2018 podem ser devido a avaliação ter sido realizada após os cultivos seguidos de feijão e soja, durante a safra de outono/inverno 2017 e primavera/verão 2017/18, respectivamente. Possivelmente, devido à degradação mais acelerada da palhada dessas culturas que apresentam baixa relação C/N. Por sua vez, durante os anos 2017 e 2018, anterior a amostragem de solo, foi cultivado trigo e milho, ambos com palhada de alta relação C/N.

De forma geral, não são esperadas grandes variações entre os teores de MO do solo sob SPD, quando comparado com aqueles em que houve algum distúrbio mecânico. Normalmente, mudanças nos teores de MO ocorrem após longo tempo de cultivo, além de serem restritas às camadas mais superficiais, conforme observado por diversos autores, que compararam os teores de MO nas camadas superficiais dos solos sob SPD com os de solos com preparo (SANTIAGO et al., 2008; AZIZ et al., 2013; MOTSCHENBACHER et al., 2014; FINK et al., 2016; SOUZA et al., 2016). Ressalta-se também que na maioria dos casos, as variações são restritas à camada de 0 a 5 cm e nesse trabalho as avaliações foram na camada de 0 a 20 cm. Moreira (2003) observou aumento de 12 g kg⁻¹ na camada de 0 a 5 cm de um solo sob SPD, comparado a um solo sob sistema convencional. No entanto, essa mudança foi observada após 12 anos de cultivo.

Verifica-se na Tabela 4, que houve um gradiente vertical nos teores de Ca, H+Al, MO e V%, com maiores valores na camada de 0 a 20 cm. Segundo Basso et al. (2015), o manejo do solo com intervenção mecânica em áreas há 12 anos sob SPD não foi capaz de minimizar o gradiente de fertilidade do solo. Normalmente, em solos sob SPD, há maiores teores de nutrientes e MO na camada superficial (SANTIAGO et al., 2008; AZIZ et al., 2013;

MOTSCHENBACHER et al., 2014; FINK et al., 2016; SOUZA et al., 2016). No tratamento SBC a camada de 0 a 20 cm, a V% apresentou valor de 54%, corroborando com os resultados encontrados por Alleoni et al. (2003), que para a camada de 0 a 20 cm a saturação por bases acima de 53% é suficiente para atingir o máximo rendimento de grãos.

A fim de se avaliar a relação entre os teores de nutrientes no solo e as produtividades das culturas foi feito um estudo de correlação entre os atributos químicos do solo e a produtividade das culturas (TABELA 6). De forma geral, não houve correlação positiva e significativa entre os valores de pH e teores de Ca, Mg, MO e valores V% com a produtividade de nenhuma das culturas, havendo correlações negativas em alguns casos. Também não houve correlação entre os teores de H+Al e produtividade das culturas. Dessa forma, as variações observadas nas produtividades não ocorreram em função das variações nos atributos químicos dos solos, mas por outros fatores. Possivelmente esse fato ocorreu porque as variações ocorridas nos teores de nutrientes, e nos valores de pH e V% foram pouco pronunciadas entre os tratamentos (TABELA 6).

Tabela 5 - Coeficiente de correlação de Pearson entre os atributos químicos do solo nas profundidades de 0 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm e produtividade das culturas de verão.

Atributo	pH	Ca	Mg	Al	H+Al	MO	T	V	
2017									
Produtividade	Profundidade								
	0-20 cm								
		-0,71	-0,54*	-0,43	0,16*	0,64	0,00	0,41	-0,66*
Milho 2016/17	20-40 cm								
		-0,42	0,04*	-0,16	0,12	0,38	0,03	0,35	-0,07
	40-60 cm								
	-0,34*	-0,11	-0,33	-0,01	0,26	0,08	0,10	-0,24	
2018									
Soja 2017/18	0-20 cm								
		-0,49*	-0,56*	-0,42	0,53	0,46*	0,32	-0,35	-0,53*
	20-40 cm								
	-0,48	-0,51	-0,44	0,39	0,13	0,30	-0,36	-0,38	
Milho 2018/19	40-60 cm								
		-0,71	-0,45	-0,44	0,45	0,18	0,02	-0,35	-0,40
	2019								
Milho 2018/19	0-20 cm								
		0,12	0,17	0,19	-0,23	-0,13	-0,31	0,09	0,18
	20-40 cm								
	0,06	0,27	0,38	0,24	0,10	-0,30	0,38	0,20	
Milho 2018/19	40-60 cm								
		0,51*	0,30	0,32	0,25	-0,47	-0,12	-0,02	0,47

Ca = cálcio, Al = alumínio, H+Al = poder tampão, T = capacidade de troca de cátions, MO = matéria orgânica e V = saturação por bases. Significativo ao nível de $p = 0,05$.

Fonte: Do autor (2019).

3.8 Atributos físicos

Na **Tabela 6** são apresentados os valores médios dos atributos macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), porosidade total (PT), densidade do solo (Ds), capacidade de campo relativa (RFC) e resistência à penetração (RP). Os atributos físicos proporcionam uma avaliação da qualidade e do grau de degradação do solo, auxiliando na identificação de práticas de uso sustentável. Nesse sentido, a análise conjunta dos atributos proporciona um melhor entendimento dos efeitos das práticas de descompactação do solo, contribuindo para a melhoria das condições químicas e biológicas dos solos (ANDRADE; STONE, 2009).

Tabela 7 - Valores médios dos atributos físicos avaliados nas profundidades de 0 a 5, 20 a 25, 30 a 35 e 45 a 50 cm, durante o cultivo de soja (estádio R2 = florescimento), na safra 2017/18.

Tratamentos	Prof. cm	Mac m ³ m ⁻³	Mic m ³ m ⁻³	PT m ³ m ⁻³	Ds Mg m ⁻³	RFC	RP MPa
SPD	0-5	0,19	0,39	0,58	1,00	0,6	0,6
	20-25	0,21	0,35	0,56	1,05	0,6	0,6
	30-35	0,19	0,33	0,52	1,05	0,6	0,5
	45-50	0,20	0,39	0,59	0,97	0,6	0,6
SB2	0-5	0,37	0,45	0,82	0,80	0,5	0,3
	20-25	0,20	0,37	0,57	1,05	0,6	0,6
	30-35	0,23	0,38	0,61	1,01	0,6	0,5
	45-50	0,25	0,36	0,61	1,00	0,6	0,4
SB3	0-5	0,15	0,37	0,52	1,09	0,7	1,1
	20-25	0,18	0,37	0,55	1,16	0,6	0,7
	30-35	0,24	0,37	0,61	1,00	0,6	0,4
	45-50	0,26	0,44	0,70	0,83	0,6	0,4
SBC	0-5	0,18	0,37	0,55	1,03	0,6	0,5
	20-25	0,16	0,34	0,50	1,10	0,7	0,6
	30-35	0,22	0,33	0,55	1,06	0,6	0,5
	45-50	0,20	0,36	0,56	0,99	0,6	0,5
Valores referência na literatura							
		0,14 ^a	-	0,51 ^a	1,3 ^a	0,6 ^b	2,0 ^c

SPD = sistema de plantio direto, SB2 = subsolagem profunda a cada dois anos, SB3 = subsolagem profunda a cada três anos, SBC = subsolagem profunda com enterrio de 1440 kg ha⁻¹ de calcário (30% de MgO, 60% de CaO, PRNT de 175% e PN de 183%), Mac= macroporosidade, Mic = microporosidade, PT = porosidade total, Ds = densidade do solo, RFC = capacidade de campo relativa, RP = resistência à penetração. a: valores extraídos de Andrade; Stone (2009), b: valores extraídos de Reynolds et al. (2008), c: valores extraídos de Serafim et al. (2008).

Fonte: Do autor (2019).

Os valores da Mac e PT apresentam-se acima do nível crítico considerado adequado por Andrade e Stone (2009), sendo que valores acima do nível crítico apresentam boas adequações ao atributos. Segundo Kiehl (1979), para que os valores de Mac aproximem da distribuição ideal de tamanho de poros, a PT deve apresentar uma relação de 1/3 de Mac e 2/3 de Mic, corroborando com os valores de Mac apresentados. Entratanto, na profundidade de 0 a 5 cm, a relação apresentada foi de 52 e 25% nos solos com subsolagem a cada dois e três anos, ficando fora da faixa considerada adequada.

A Ds também apresentou valores abaixo do nível crítico proposto por Andrade e Stone (2009), na camada de 20 a 25 cm, sendo que o solo com subsolagem, a cada três anos

apresentou valor 10% maior que o solo sob SPD. Nesse sentido, pode-se verificar que as condições físicas do solo não foram restritivas ao desenvolvimento radicular das culturas, as quais foram adequadas ao bom desenvolvimento das plantas, independentemente da intervenção mecânica.

Ao avaliar a RFC, esta apresenta valores médios de 0,6, enquadrando dentro da faixa adequada proposta por Reynolds et al. (2008). Entretanto, na camada de 0 a 5 cm para os solos com subsolagem a cada dois e três anos, os valores observados foram de 0,5 e 0,7 respectivamente. Quando os valores encontram na faixa de $0,6 \leq RFC \leq 0,7$, o solo apresenta teor de água e ar desejável para as culturas (REYNOLDS et al., 2009).

Ao avaliar a RP verifica-se que nos quatro tratamentos e nas quatro profundidades avaliadas, não foram encontrados valores superiores a 2,0 MPa, que é o valor crítico proposto por Reynolds et al. (2008). A camada de 0 a 5 cm, no solo com subsolagem a cada três anos apresentou valor 83% maior que o tratamento SPD na mesma profundidade. Nesse sentido, pode-se dizer que não houve nenhuma restrição física ao desenvolvimento da cultura da soja, instalada no local, na época das avaliações. Na camada de 30 a 35 cm onde normalmente há uma maior RP, devido as práticas de revolvimento do solo anterior à implantação do SPD, os valores observados estavam entre 0,4 e 0,5 Mpa, indicando que a RP também não foi restritiva ao desenvolvimento radicular da cultura.

Na **Tabela 7** são apresentadas as relações entre os atributos físicos e a produtividade da soja cultivada na safra 2017/18. Houve correlação positiva e significativa entre Mic nas camadas de 20 a 25 e 30 a 35 cm, com a produtividade da soja, sendo que a Mic está relacionada com a retenção de água e, conseqüentemente, ao abastecimento das plantas. O mesmo fato ocorreu entre a PT da camada de 30 a 35 cm e a produtividade de soja. Também houve correlação positiva para Mac na camada de 45 a 50 cm e a produtividade de soja cultivada na safra 2017/18. Nesse sentido, a produtividade de soja 2017/18 foi significativamente afetada pela Mac, Mic e PT, dessas camadas, corroborando com os resultados obtidos por Montanari et al. (2013), que identificaram que a produtividade do feijoeiro em um Latossolo Vermelho tinha uma relação direta com a PT.

Tabela 8 - Coeficiente de correlação de Pearson entre atributos físicos do solo e produtividade da soja.

Atributo	Mac	Mic	PT	Ds	RFC	RP
Produtividade Soja 17/18	Profundidade					
	0-5 cm					
	0,44	0,43	0,35	-0,35	-0,27	0,16
	20-25 cm					
	0,13	0,78*	-0,08	0,10	-0,04	0,04
30-35 cm						
0,39	0,92*	0,75*	-0,68	-0,24	-0,37	
45-50 cm						
0,91*	0,38	0,42	-0,38	-0,63	-0,54	

Mac= macroporosidade, Mic = microporosidade, PT = porosidade total, Ds = densidade do solo, RFC = capacidade de campo relativa, RP = resistência à penetração. Significativo ao nível de $p = 0,05$.

Fonte: Do autor (2019).

3.9 Produtividade das culturas

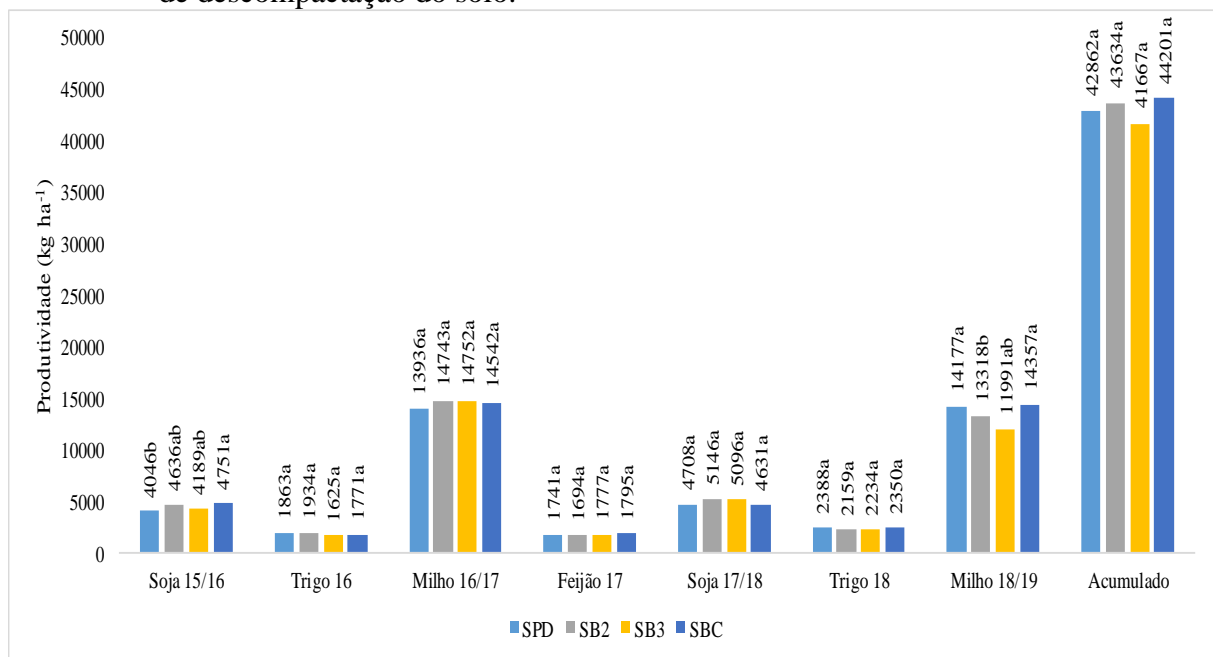
Após sete cultivos (2015 a 2019) observa-se que houve influência dos tratamentos na produtividade das culturas, apenas nas safras 2015/16 (soja) e 2018/19 (milho) (FIGURA 2). No caso da cultura da soja, a produtividade de grãos no tratamento com subsolagem e enterrio do calcário em profundidade foi superior ao tratamento sem revolvimento (SPD). Por sua vez, na safra 2018/19, a produtividade do milho nesses dois tratamentos foi a mesma, mas superior à do milho produzido no tratamento com subsolagem a cada três anos.

Logo após o cultivo da soja na safra 2015/16, Guimarães et al. (2016) avaliaram que a RP era maior no solo sob SPD, o que pode ter comprometido a produtividade da soja no primeiro ano. No entanto, após vários anos de cultivo, observa-se que as diferenças nas produtividades não podem mais ser explicadas por diferenças entre os valores de RP (TABELA 6), uma vez que os mesmos estão bem abaixo dos valores considerados altos por Reynolds et al. (2008). De maneira geral, as formas de descompactação variando o tempo e enterrio de calcário não promoveram aumentos significativos de produtividade em relação ao tratamento SPD, como também observado por Seki et al. (2015), onde em um Nitossolo Vermelho as operações de subsolagem não interferiram na produtividade de grãos na cultura do milho.

Ao comparar as produtividades das culturas no sistema de produção, pode-se verificar que a soja 2017/18 apresentou um ganho médio de produtividade de 12% em relação à soja 2015/16. Para o cultivo de trigo, 2018 apresentou um ganho de 36% em relação ao trigo 2016, não era esperado esse ganho de produtividade, já que a adubação foi com base na necessidade

da cultura e a distribuição pluviométrica ter sido 85 mm menor que no primeiro cultivo. Para o cultivo de milho 2018/19 houve uma queda de 9% na produtividade comparada ao milho 2016/17. Neste caso, houve um período de veranico durante o cultivo de milho 2018/19, onde no mês de janeiro apresentou uma precipitação acumulada de apenas 87 mm, ficando abaixo da média observada para o mês de janeiro durante a condução do experimento de 224 mm. Na safra 2018/19 essa baixa disponibilidade de água pode ter afetado a produtividade por que ela ocorreu durante o enchimento de grãos da cultura do milho.

Figura 2 - Produtividade das culturas e produção acumulada de grãos em função das formas de descompactação do solo.



SPD = sistema de plantio direto, SB2 = subsolagem profunda a cada dois anos, SB3 = subsolagem profunda a cada três anos, SBC = subsolagem profunda com enterrio de 1440 kg ha⁻¹ de calcário (30% de MgO, 60% de CaO, PRNT de 175% e PN de 183%). Médias seguidas de letras distintas minúsculas na coluna, comparam os tratamentos, diferem entre si pelo teste de Tukey, no nível de $\alpha=0,05$.

Fonte: Do autor (2019).

A produção acumulada de grãos ao longo desse período não foi influenciada pelas formas de subsolagem (FIGURA 2). De maneira geral, fica evidente que em solos manejados sob SPD consolidado há mais de 10 anos, a subsolagem deve ser utilizada somente após avaliadas as condições físicas do solo. O SPD de longo tempo proporcionou aumento da produtividade das culturas devido a melhor estrutura do solo promovido pela sucessão/rotação de culturas.

4 CONCLUSÃO

Após dois anos de cultivo, a utilização de subsolador com enterrio de calcário na camada de 40 a 60 cm de profundidade, aumentou os valores de pH e V% e os teores de Ca, comparado ao SPD, na média das profundidades avaliadas.

As formas de descompactação do solo não foram capazes de promover alterações nos atributos físicos do solo, comparado ao solo sob sistema de plantio direto consolidado.

Com exceção do primeiro ano, as formas de subsolagem não influenciaram as produtividades das culturas.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, F.; RAWAYFIH, Z. Basalumite and alumite: a possible cause of sulfate retention by acid soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 41, n. 4, p. 686-692, 1977.
- ALLEONI, L.R.F. et al. Liming and eletrochemical attributes of an oxisol under no tillage. **Scientia Agricola**, [s.l.], v. 60, n. 1, p. 119-123, jan./mar. 2003.
- AMARAL, A.S.; ANGHINONI, I.; DESCHAMPS, F.C. Resíduos de plantas de cobertura e mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 115-123, 2004.
- ANCÂNTARA, F.A. et al. Adubação verde na recuperação da fertilidade de um latossolo vermelho-escuro degradado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 2, p. 277-288, fev. 2000.
- ANDRADE JUNIOR, O. de. et al. Crescimento e produtividade de milho em três sistemas de manejo de solo e dois espaçamentos entrelinhas. **Semina: Ciências Agrárias**, [s.l.], v. 35, n. 3, p. 1221-1229, 2014.
- ANDRADE, R.D.S.; STONE, L.F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 4, p. 382-388, 2009.
- ANDRADE, R.S.; STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. Plantas de cobertura e qualidade física do solo. In: SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F. **Plantas de cobertura dos solos do Cerrado**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa, 2010. p. 163-180.
- ARAUJO, M.A.; TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 28, p. 337-345, 2004.
- AULER, A.C.; PIRES, L.F.; CAIRES, E.F. Surface and incorporated liming effects on clay dispersion, water availability, and aeration capacity of a Dystrupt soil. **Bragantia**, Campinas, v. 76, n. 3, p. 433-446, 2017.
- AZIZ, I.; MAHMOOD, T.; ISLAM, K.R. Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality. **Soil & Tillage Research**, [s.l.], v. 131, p. 28-35, 2013.
- BASSO, C.J. et al. Intervenção mecânica e gesso agrícola para mitigar o gradiente vertical de cátions sob sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 4, p. 456-463, out./dez. 2015.
- BELLÉ, M.P. et al. Demanda energética e mobilização do solo com uso de escarificadores em sistema de semeadura direta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 5, p. 551-558, 2014.
- BENGOUGH, A.G. et al. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, [s.l.], v. 62, n. 1, p. 59-68, 2011.

BENGOUGH, A.G.; MULLINS, C.E. The resistance experienced by roots growing in a pressurised cell. A reappraisal. **Plant and Soil**, [s.l], v. 123, p. 73-82, 1990.

BERGAMIM, A.C. et al. Compactação em um Latossolo Vermelho distoférrico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l], v. 34, p. 681-691, 2010.

BERGAMIN, A.C. Compactação do solo em sistemas intensivos de produção. **Informações Agrônomicas**, [s.l], v. 164, p. 1-12, dez. 2018.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l], v. 36, n. 6, p. 581-588, 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G. Relação entre alguns atributos físicos e a produção de grãos de soja e arroz de sequeiro em latossolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 365-371, mar./abr 2004.

BROWN, V. et al. Efeitos no solo e nas culturas após vinte anos de cultivo convencional e semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 13, n. 1, p. 1-7, 2018.

CAIRES, E.F. et al. Surface liming and nitrogen fertilization for crop grain production under no-till management in Brazil. **European Journal of Agronomy**, [s.l], v. 66, p. 41-53, 2015.

CAIRES, E.F. Correção da acidez do solo em sistema de plantio direto. **Informações Agrônomicas**, [s.l.], n. 141, mar. 2013. p. 1-13.

CAIRES, E.F. et al. Soil acidity, liming and soybean performance under no-till. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 56, n. 5, p. 532-540, set/out. 2008.

CAIRES, E.F. et al. Calagem superficial e cobertura de aveia preta antecedendo os cultivos de milho e soja em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l], v. 30, p. 87-98, 2006.

CAIRES, E.F. et al. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. **Agronomy Journal**, [s.l], v. 97, p. 791-798, 2005.

CAIRES, E.F. et al. Crescimento radicular e nutrição da soja cultivada no sistema plantio direto em resposta ao calcário e gesso na superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l], v. 25, p. 1029-1040, 2001.

CAIRES, E.F.; JORIS, H.A.; CHURKA, S. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till. **Soil Use and Management**, [s.l], v. 27, p. 45-53, March, 2011.

CALONEGO, J.C.; FOLONI, J.S.S.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio da palha de plantas de cobertura em diferentes estádios de senescência após a dessecação química. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, [s.l], v. 29, p. 99-108, 2005.

CAVALIERI, K.M.V. et al. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 30, p. 137-147, 2006.

CECAGNO, D. et al. Last limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazings intensities. **Soil & Tillage Research**, [s.l.], v. 156, p. 54-62, 2016.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Brasília: CONAB, 2018. p. 1-155.

CORBEELS, M. et al. Evidence of limited carbon sequestration in soils under no-tillage systems in the Cerrado of Brasil. **Scientific Reports**, [s.l.], p. 1-8, 2016.

EDWARDS, W.M. et al. Rainfall Intensity Affects Transport of Water and Chemicals through Macropores in No-Till Soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 52-58, 1992.

EHLERS, W. et al. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil & Tillage Research**, [s.l.], v. 3, p. 261-275, 1983.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. [s.l.]: Embrapa, 2011.

ENCIDE-OLIBONE, A.P.; OLIBONE, D.; ROSOLEM, C.A. Atividade radicular da soja: definição de um método. **Revista Brasileira**, [s.l.], v. 32, p. 899-903, 2008.

FEMA. Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais: legenda expandida**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010.

FERREIRA, D. F.; LÚCIO, A. Dal'Col.; CARGNELUTTI FILHO, A. Procedimentos estatísticos em planejamentos experimentais com restrições na casualização. **Boletim Informativo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, 2012. p. 16-19.

FIDELIS, R.R. et al. Alguns aspectos do plantio direto para a cultura da soja. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 29, n. 1, p. 23-31, jan./abr. 2003.

FINK, J.R. et al. Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. **Ciência e Agrotecnologia**, [s.l.], v. 40, n. 4, p. 369-379, jul./ago, 2016.

FLINT, A.L.; FLINT, L.E. Particle density. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Society of America, 2002. p. 229-240.

FRANCHINI, J.C. et al. Correção da acidez subsuperficial pela aplicação de calcário na superfície e uso de plantas de cobertura e adubação verde. In: SARAIVA, O.F.; LEITE, R. M. V.B.C. **Resultados de pesquisa da Embrapa soja 2006**. [s.l.]: [s.n.], 2008. Cap. 4, p. 125-131.

FRANCHINI, J.C. et al. Potencial de extratos de resíduos vegetais na mobilização do calcário no solo por método biológico. **Scientia Agrícola**, [s.l.], v. 58, n. 2, p. 357-360, abr./jun. 2001.

FRANCHINI, C.J. et al. Dinâmica de íons em solo ácido lixiviado com extratos de resíduos de adubos verdes e soluções puras de ácidos orgânicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 12, p. 2267-2276, dez. 1999.

FREDDI, O.S. et al. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 31, p. 627-636, 2007.

FLINT, A.L.; FLINT, L.E. Particle density. In: DANE, J.H; TOPP, G.C. (Ed). *Methods of soil analysis: part 4 – physical methods*. Madison: American Society of America, 2002. p. 229-240.

GENERO JUNIOR, S.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo Argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 28, n. 3, p. 477-484, 2004.

GIRARDELLO, V.C. et al. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento radicular da soja sob sistema de plantio direto com tráfego controlado de máquinas agrícolas. **Revista Scientia Agraria**, [s.l.], v. 18, n. 2, p. 86-96, abr/jun 2017.

GIRARDELLO, V.C. et al. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo Argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 38, p. 1234-1244, 2014.

GOMIDE, P.H.O.; SILVA, M.L.N.; SOARES, C.R.F.S. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo em ambientes de voçorocas no município de Lavras - MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 35, p. 567-577, 2011.

GROSSMAN, R.B.; REINSCH, T.G. Bulk density and linear extability. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. **Methods of soil analysis: Physical Methods**. [s.l.]: Soil Society of America, 2002. p. 201-208.

GROVE, J.H.; BLEVINS, R.L. **Correcting soil acidification in continuous corn (zea mays L.): N rate, tillage and time**. Communications in Soil Science and Plant Analysis. [s.l.]: [s.n.]. 1988. p. 7-12.

GUIMARÃES, C.M.; STONE, L.F.; MOREIRA, J.A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro II: efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 6, n. 2, p. 213-218, 2002.

GUIMARÃES, E.V.; SILVA, B.M.; BATISTA, A.M.; MELO, M.L. A.; ARAUJO, G.S.S.; MOURA, M.S.; MOTA, P K.; BORGHI, E. Resistência à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico em fase inicial de estabelecimento de sistemas intensivos de cultivo de grãos. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 2016, 31., **Anais...** Bento Gonçalves, 2016.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping system A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, [s.l.], v. 82, p. 121-145, 2005.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo agropecuário**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. p. 1-108.

INAGAKI, T.M. et al. Lime and gypsum application increases biological activity, carbon pools, and agronomic productivity highly weathered soil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [s.l.], v. 231, p. 156-165, 2016.

JORGE, L.A.C.; RODRIGUES, A.F.O. **Safira**: Sistema de de análise de fibras e raízes. São Carlos: Embrapa, 2008.

JORIS, H.A.W. et al. Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. **Plant Soil**, [s.l.], n. 365, p. 409-424, 2013.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979.

KLEIN, V.A.; CAMARA, R.K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 31, p. 221-227, 2007.

LETEY, J. Relationship between soil physical proprieties and crop production. **Advances in Soil Science**, [s.l.], v. 1, p. 277-294, 1985.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do Agronegócio Brasil 2016/17 a 2016/27 Projeções de Longo Prazo**. Brasília: MAPA, 2017. p. 325.

MARTÍNEZ, I. et al. Two decades of no-till in the Oberacker long-term fiel experiment: Part II. Soil porosity and gas transport parameters. **Soil & Tillage Research**, [s.l.], v. 163, p. 130-140, 2016.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; FRANCHINI, J.C. Evaluation of plant residues on the mobility of surface applied lime. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, [s.l.], v. 45, n. 3, p. 251-256, September 2002.

MOLIN, J.P.; DIAS, C.T.S.; CARBONERA, L. Estudos com penetrometria: Novos equipamentos e amostragem correta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 584-590, 2012.

MONTANARI, R. et al. Correlação entre produção de feijão e atributos físicos de um Latossolo em Mato Grosso do Sul. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 60, n. 6, p. 772-784, nov./dez. 2013.

MONTEIRO, M.A.C. et al. Efeito de preparo do solo com diferentes implementos sobre a resistência do solo à penetração. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, v. 4, n. 2, p. 63-68, 2017.

MOREIRA, S.G. et al. Calagem em sistema de semeadura direta e efeito sobre a acidez do solo, disponibilidade de nutrientes e produtividade de milho e soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 25, p. 71-81, 2001.

MOREIRA, S.G. et al. Cultivo de feijão em sistema plantio direto no Cerrado. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 39, p. 1-12, 2018.

MOTSCHENBACHER, J.M. et al. Long-term rice rotation, tillage, and fertility effects on near-surface chemical proprieties in a silt-loam soil. **Agroecosyst**, [s.l.], v. 100, p. 77-94, 2014.

NORA, D.D. et al. Alterações químicas do solo e produtividade do milho com aplicação de gesso. **Magistra**, Cruz das Almas, v. 26, n. 1, p. 1-10, jan./mar. 2014.

NUNES, M.R. et al. Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. **Soil & Tillage Research**, [s.], v. 148, p. 119-126, 2015.

OLIVEIRA, M.W. et al. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 12, p. 2359-2362, dez. 1999.

PAULETTI, V. et al. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 38, p. 495-505, 2014.

PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T.; PRATT, P.F. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium and aluminium following lime and gypsum application to a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 1, p. 33-38, 1984.

PEDROTTI, A. et al. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 25, p. 521-529, 2001.

RAMPIM, L. et al. Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 35, p. 1687-1698, 2011.

RAPER, R.L. et al. Effect of annual, bienial, and triennial in-row subsoiling on soil compaction and cotton yield in southeastern U.S. Silt Loam soil. **Applied Engineering in Agriculture**, [s.l.], v. 21, n. 3, p. 337-343, May 2005.

REEVES, J.L.; LIEBIG, M.A. Depth matters: soil pH and dilution effects in the northern great plains. **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.], v. 80, p. 424-427, 2016.

RESENDE, A.V. et al. Solos de fertilidade construída: características, funcionamento e manejo. **Informações Agrônomicas**, [s.l.], n. 156, p. 1-19, dez. 2016.

REYNOLDS, W. D. et al. Use of indicators and prove volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, [s.l.], v. 152, p. 252-263, 2009.

REYNOLDS, W.D. et al. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. **Geoderma**, [s.l.], v. 146, p. 466-474, 2008.

RODRIGUES DA SILVA, V.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Variabilidade espacial da resistência à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 399-406, mar./abr. 2004.

ROSOLEM, A.A. et al. **Soil acity, pH an aluminiu managet in tropical soils: the Brazilian experience**. In: WORD SOYBEAN RESARCH CONFERENCE, 4., INTERNATIONAL SOYBEAN PROCESSING AND UTILIZATION CONFERENCE, 4; CONGRESSO BRASILEIRO DE SOJA. **Anais...** Londrina: Embrapa Soja. 2004. p. 310-318.

SÁ, J.C.M. et al. Carbon depletion by plowing and its restoration by no-till cropping systems in oxisols of subtropical and tropical agro-ecoregions in Brazil. **Land Degradations & Development**, [s.l.], v. 26, p. 531-543, 2015.

SAEA. Superrintendência de Abastecimento e Economia Agrícola. **Projeções do agronegócio**. Belo Horizonte: SAE, 2017, p. 1-98.

SALES, R.P. et al. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto e preparo convencional no semiárido. **Revista Ciência Agronômica**, [s.l.], v. 47, n. 3, p. 429-438, jul./set. 2016.

SALVADOR, N.; BENEZ, S. H.; MION, R. L. Consumo de combustível na operação de subsolagem realizada antes e depois de diferentes sistemas de preparo periódico do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 2, p. 256-262, abr./jun. 2008.

SANTIAGO, A.D.; QUINTERO, J.M.; DELGADO, A. Long-term effects of tillage on the availability of iron, copper, manganese, and zinc in a Spanish Vertisol. **Soil & Tillage Research**, [s.l.], v. 98, p. 200-207, 2008.

SECCO, D. et al. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 1, p. 58-64, jan./fev. 2009.

SEKI, A.S. et al. Efeitos de práticas de descompactação do solo em área sob sistema plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 46, n. 3, p. 460-468, jul./set. 2015.

SILVA, A.A. et al. Sistema de plantio direto na palhada e seu impacto na agricultura brasileira. **Ceres**, Viçosa, v. 56, n. 4, p. 496-506, 2009.

SILVA, E.D. et al. Pedotransfer functions for water retention in the main soils from the brazilian coastal plains. **Ciência Agrotecnica**, Lavras, v. 39, n. 4, p. 331-338, jul./ago. 2015.

SILVA, M.P. et al. Plantas de cobertura e qualidade química e física de Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto. **Agrária**, Recife, v. 12, n. 1, p. 60-67, 2017.

SILVA, S.G.C. et al. Temporary effect of chiseling on the compaction of a Rhodic Hapludox under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 36, p. 1854-1867, 2012.

SILVEIRA, P. M. et al. Atributos químicos de solo cultivado com diferentes culturas de cobertura. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 40, n. 3, p. 283-290, jul./set. 2010.

SOUZA, J.V.R.S. et al. No-till and direct seeding agriculture in irrigated bean: Effect of incorporating crop residues on soil water availability and retention, and yield. **Agricultural Water Management**, p. 9, 2016.

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 25, p. 395-401, 2001.

TEIXEIRA, C.F.A.; PAULETO, E.A.; DA SILVA, J.B. Resistência mecânica à penetração de um argissolo amarelo distrófico típico sob diferentes sistemas de produção em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 6, p. 1165-1167, nov-dez 2003.

TORMENA, C.A. et al. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo vermelho distoférrico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 31, p. 2011-219, 2007.

VALADÃO, F.C. et al. Adubação fosfatada e compactação do solo: sistema radicular da soja e do milho e atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 39, p. 243-255, 2014.

VERONESE, M. et al. Plantas de cobertura e calagem na implantação do sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 8, p. 1158-1165, ago. 2012.

VITTI, G.C.; PRIORI, J.C. Calcário e gesso: os corretivos essenciais ao plantio direto. **Visão Agrícola**, [s.l.], v. 9, p. 30-34, 2010.

ZANDONÁ, R.R. et al. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 2, p. 128-137, abr./jun. 2015.