



LUCAS DE CASTRO MOREIRA DA SILVA

**QUALIDADE FÍSICA DO SOLO, ARMAZENAMENTO DE
ÁGUA E EROSÃO HÍDRICA EM SISTEMAS DE
PRODUÇÃO DE GRÃOS NA REGIÃO CENTRAL DE
MINAS GERAIS**

LAVRAS – MG

2020

LUCAS DE CASTRO MOREIRA DA SILVA

**QUALIDADE FÍSICA DO SOLO, ARMAZENAMENTO DE
ÁGUA E EROÇÃO HÍDRICA EM SISTEMAS DE
PRODUÇÃO DE GRÃOS NA REGIÃO CENTRAL DE
MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Junior Cesar Avanzi
Orientador
Prof. Dr. Bruno Montoani Silva
Coorientador

**LAVRAS – MG
2020**

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

Moreira da Silva, Lucas de Castro.

Qualidade física do solo, armazenamento de água e erosão
hídrica em sistemas de produção de grãos na região central de
Minas Gerais / Lucas de Castro Moreira da Silva. - 2020.

132 p. : il.

Orientador(a): Junior Cesar Avanzi.

Coorientador(a): Bruno Montoani Silva.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2020.

Bibliografia.

1. Resistividade elétrica do solo. 2. Intervalo hídrico ótimo. 3.
Perdas de solo. I. Avanzi, Junior Cesar. II. Silva, Bruno Montoani.
III. Título.

LUCAS DE CASTRO MOREIRA DA SILVA

**QUALIDADE FÍSICA DO SOLO, ARMAZENAMENTO DE
ÁGUA E EROSÃO HÍDRICA EM SISTEMAS DE
PRODUÇÃO DE GRÃOS NA REGIÃO CENTRAL DE
MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 06 de fevereiro de 2020.

Dr. Moacir de Souza Dias Junior
UFLA
Dr. Fábio Aurélio Dias Martins
EPAMIG

Prof. Dr. Junior Cesar Avanzi
Orientador
Prof. Dr. Bruno Montoani Silva
Coorientador

**LAVRAS – MG
2020**

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Cláudio e Adriana, principais incentivadores e exemplos de persistência, pelo irrestrito apoio e amor.

Aos meus orientadores, Prof. Junior Cesar Avanzi e Prof. Bruno Montoani, pela recepção em Lavras, pelos ensinamentos e conselhos, por estarem sempre de portas abertas para me ajudar, por todo apoio, pela gratificante amizade e pela excelente convivência.

A todos os professores do DCS/UFLA pelo aprendizado, em especial Prof. Geraldo Oliveira e Prof. Nilton Curi, por todos os ensinamentos, conselhos e amizade.

Aos membros da banca Prof. Moacir Dias Junior e Dr. Fábio Aurélio Martins pelas relevantes contribuições neste trabalho.

Ao camarada Devison Peixoto, grande amigo e importante orientador deste trabalho, por toda ajuda, pelos ensinamentos, pelo companheirismo e pelas boas risadas.

A toda equipe da Física e Conservação do Solo, em especial aos amigos com os quais tive o prazer de compartilhar a sala de estudos.

Aos amigos Teo e Dulce do Laboratório de Física do Solo, por todo ensinamento, amizade e pela relevante ajuda nas análises.

Aos pesquisadores da Embrapa Milho e Sorgo, Dr. Emerson Borghi e Dr. Álvaro Vilela de Resende, bem como a todos os funcionários da unidade, pelos ensinamentos e apoio na condução do experimento.

A todos os funcionários, professores e amigos da UFLA e UFV pela convivência e pelos ensinamentos no âmbito pessoal e profissional.

Aos amigos de BH e Viçosa pela amizade verdadeira e por estarem ao meu lado independente da distância física.

Aos amigos de longa data com os quais tive o privilégio de reencontrar e conviver diariamente em Lavras, Xuxa e Grampo.

Ao CNPq, CAPES, FAPEMIG e EMBRAPA pelo apoio financeiro e concessão de bolsas de estudo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) processos CAG - APQ-02075-16 e PPM-00774-18 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) processos 422538/2016-7 e 408204/2016-8.

Aos que acreditam e lutam por um mundo melhor, minha solidariedade.

Muito obrigado!

“Doubt is not a pleasant condition, but certainty is an absurd one.”

Voltaire

RESUMO GERAL

A qualidade física do solo é determinada por uma série de variáveis as quais exercem influência direta em propriedades químicas e biológicas do solo, portanto constituindo função central no agroecossistema. Considerando os fatores que influenciam o crescimento e desenvolvimento de plantas, a umidade do solo é a propriedade preponderante, por afetar diretamente outros atributos físicos. A região central do estado de Minas Gerais, inserida no bioma Cerrado, apresenta regime de chuvas mal distribuído, o que limita a atividade agrícola em condições de sequeiro. Ademais, a ocorrência de veranicos na safra de verão é recorrente, o que compromete a produtividade das lavouras devido ao déficit hídrico. A baixa disponibilidade de água decorrente da má distribuição de chuvas pode ser acentuada caso haja degradação da estrutura do solo, comprometendo sua qualidade física. Práticas que resultem no aumento da infiltração e do armazenamento de água no solo para atender a demanda vegetal, bem como promovam o aprofundamento radicular para permitir o acesso das plantas à água em camadas mais profundas e que resultem em incremento da matéria orgânica e redução da compactação do solo são essenciais para o êxito da produção. O presente estudo teve como objetivos avaliar o armazenamento de água no solo, a qualidade estrutural do solo, os processos de escoamento superficial e erosão hídrica e a produtividade de soja e milho em diferentes sistemas de rotação de culturas após cinco anos de implantação do sistema plantio direto. A avaliação do armazenamento de água no solo foi feita pelo método da tomografia de resistividade elétrica do solo, a qualidade estrutural do solo foi avaliada por meio da abordagem do Intervalo Hídrico Ótimo. A avaliação dos processos de perda de água por escoamento superficial e perdas de solo por erosão hídrica foi realizada por meio do monitoramento em parcelas de escoamento nas lavouras. Os resultados indicam que sistemas mais diversificados de cultivo, sobretudo que envolvem a rotação com forrageiras de sistema radicular agressivo apresentam melhorias na condição física do solo, produzem biomassa satisfatória para fornecer cobertura adequada à superfície do solo, promovem o maior armazenamento de água no solo, reduzem as perdas de solo, água e nutrientes e aumentam a produtividade das culturas de interesse.

Palavras-chave: Intervalo Hídrico Ótimo. Resistividade elétrica do solo. Perdas de solo.

GENERAL ABSTRACT

Soil physical quality is determined by several variables which have a direct influence on soil chemical and biological properties, thus constituting a central function in the agroecosystem. Considering the factors that influence plant growth and development, soil moisture is the predominant property, as it directly affects other physical attributes. The central region of the state of Minas Gerais, Brazil, inserted in the Cerrado biome, presents a poorly distributed rainfall regime, which limits agricultural activity in rainfed conditions. In addition, the occurrence of summer crops in the summer harvest is recurrent, which compromises the productivity of the crops due to the water deficit. The low availability of water due to poor rainfall distribution can be accentuated if there is soil structure degradation, compromising soil physical quality. Practices that result in increased infiltration and water storage in the soil profile to meet plant demand, as well as promoting deeper root development to allow plants access water in deeper layers, resulting in increased organic matter and reduced soil compaction are essential for successful agricultural production. The study aims evaluate soil water storage, soil structural quality, runoff and soil losses by water erosion, as well as maize and soybean yield in different crop rotation systems after five years of implantation of no-till system. The evaluation of soil water storage was done by electrical resistivity tomography method and the soil structural quality was evaluated through the Least Limiting Water Range approach. The evaluation of water losses by runoff and soil losses by water erosion was carried out through the monitoring of runoff plots in the field. The results indicate that more diversified cropping systems, especially those involving rotation with forages with an aggressive root system, lead to improvements in soil physical condition, produce satisfactory biomass to provide adequate soil cover, promote greater water storage, reduce soil, water and nutrient losses and increase the crop yield.

Keywords: Least Limiting Water Range. Soil electrical resistivity. Soil losses.

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|------|---|
| AC | capacidade de aeração |
| AFP | porosidade de aeração |
| AIC | critério de informação de Akaike |
| Bd | densidade do solo |
| CEC | capacidade de troca catiônica |
| CR | taxa de cobertura morta na superfície do solo |
| FC | capacidade de campo |
| GMD | diâmetro médio geométrico |
| LLWR | Intervalo Hídrico Ótimo |
| Ma | macroporosidade |
| MAE | erro médio absoluto |
| Mi | microporosidade |
| MSW | peso de 100 grãos de milho |
| MWD | diâmetro médio ponderado |
| MY | produtividade de milho |
| NGP | número de grãos por vagem |
| NGR | número de grãos por fileira |
| NPP | número de vagens por planta |
| NRE | número de fileiras por espiga |
| NT | sistema plantio direto |
| OC | carbono orgânico |
| PAWC | capacidade de água disponível |
| Pd | densidade de partículas |
| PWP | ponto de murcha permanente |
| RFC | capacidade de campo relativa |
| RMSE | raiz do erro quadrático médio |
| RY | produtividade relativa de grãos |
| SL | perdas de solo |
| SPR | resistência à penetração |
| SSW | peso de 100 grãos de soja |
| SY | produtividade de soja |

| | |
|----------|-------------------------------------|
| T_p | porosidade total |
| WL | perdas de água |
| WSA | índice de estabilidade de agregados |
| θ | conteúdo de água no solo |
| ρ | resistividade elétrica do solo |
| Ψ | potencial matricial |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO GERAL (SEÇÃO PRIMÁRIA)..... | 12 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO (SEÇÃO PRIMÁRIA)..... | 13 |
| 2.1. Qualidade física do solo | 13 |
| 2.2. Resistividade Elétrica do solo | 15 |
| 2.3. Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) | 15 |
| 2.4. Erosão hídrica | 16 |
| 3 CONSIDERAÇÕES GERAIS | 18 |
| REFERÊNCIAS | 19 |
| SEGUNDA PARTE – ARTIGOS | 23 |
| ARTIGO I – Armazenamento de água no solo medido pela resistividade elétrica em um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto | 23 |
| ARTIGO II – Variação temporal da estrutura do solo e desempenho agrônômico de milho e soja em sistemas de plantio direto na região central de Minas Gerais | 56 |
| ARTIGO III – Qualidade física do solo, erosão hídrica e produtividade de sistemas de produção de grãos na região central de Minas Gerais..... | 93 |

1 INTRODUÇÃO GERAL

Os Latossolos constituem a classe de solo dominante do Brasil, correspondendo a mais de 60% da superfície do país (SCHAEFER; FABRIS; KER, 2008) e aproximadamente 50% da área do Cerrado (REATTO; MARTINS, 2005). Latossolos do Cerrado apresentam alto grau de intemperismo e comumente exibem severa restrição química ao desenvolvimento de plantas. Em geral, esses solos possuem baixa capacidade de troca catiônica (CEC), alta saturação por alumínio e baixa disponibilidade de nutrientes (GOEDERT, 1983; LOPES, 1984; LOPES; COX, 1977), todavia, quando solucionadas as limitações químicas com o aporte de corretivos e fertilizantes, apresentam alto potencial produtivo (CASTRO; CRUSCIOL, 2013; GOEDERT, 1983).

A mineralogia oxidica, principalmente sob influência da gibbsita, presente na fração argila dos Latossolos do Cerrado, desempenha papel fundamental na estruturação desses solos gerando uma estrutura granular fortemente desenvolvida (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999; KER, 1997). A estrutura granular confere ao solo condições físicas favoráveis ao crescimento de plantas, apresentando, em geral, baixa densidade, alta macro e microporosidade, alta estabilidade de agregados, alta taxa de infiltração e baixa resistência mecânica à penetração de raízes, além da incidência majoritária em relevo suavizado, conveniente à exploração agrícola mecanizada em larga escala (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999; GOEDERT, 1983; KER, 1997; LEÃO et al., 2006; RESENDE et al., 2007; SEVERIANO et al., 2011; SILVA et al., 2015).

O município de Sete Lagoas, localizado na região central de Minas Gerais e inserido no bioma Cerrado apresenta o regime de chuvas mal distribuído, com volume de precipitação concentrado entre os meses de outubro a abril, o que limita a atividade agrícola em condições de sequeiro fora deste intervalo. Ademais, a ocorrência de veranicos na safra de verão é recorrente, o que compromete a produtividade das lavouras devido ao déficit hídrico.

A condição de escassez hídrica requer manejo rigoroso e impõe aos sistemas de produção atuais o desafio de atingir altas produtividades otimizando o uso de água pelas culturas (SRAYEDDIN; DOUSSAN, 2009). A baixa disponibilidade de água decorrente da sazonalidade de chuvas pode ser acentuada caso haja degradação da estrutura do solo, comprometendo sua qualidade física (SAFADOUST et al., 2014). A qualidade física do solo determina a capacidade de infiltração de água na superfície bem como a redistribuição e retenção de água no perfil. Práticas que resultem na capacidade do solo em promover a infiltração, diminuir as perdas de água por escoamento superficial e aumentar o armazenamento

de água no solo para atender a demanda das plantas são essenciais para o êxito da produção (DEXTER, 2004).

O Sistema Plantio Direto (SPD) progressivamente desperta o interesse de produtores pela eficiência na conservação do solo e da água bem como pela redução do trabalho necessário para o preparo de solo convencional, resultando em economia de tempo e combustível e possibilitando um maior retorno econômico (BLEVINS et al., 1971; DERPSCH et al., 2010; LAL; REICOSKY; HANSON, 2007). Estima-se que atualmente 180 milhões de hectares estejam sob SPD em nível mundial (KASSAM; FRIEDRICH; DERPSCH, 2018). O SPD é uma prática de agricultura conservacionista a qual possui três pilares em sua definição: ausência ou mínimo revolvimento do solo, manutenção permanente de cobertura vegetal na superfície e diversificação de espécies de plantas (KASSAM; FRIEDRICH; DERPSCH, 2018).

Sistemas de produção que promovam o uso racional dos recursos hídricos e priorizem a conservação do solo e da água são fundamentais para o futuro sustentável da atividade agrícola (IGLESIAS; GARROTE, 2015). A adoção e o manejo adequado de sistemas conservacionistas é crucial para o incremento da infiltração e armazenamento de água no solo, evitando as perdas de água por escoamento superficial e evaporação, sobretudo em localidades que pratiquem a agricultura de sequeiro (ASMAMAW, 2017; DEXTER, 2004).

Diante do exposto, o presente trabalho visa avaliar sistemas de produção de grãos em SPD investigando os efeitos de níveis de investimento em fertilidade do solo, rotação de culturas e consórcio com braquiária na qualidade física do solo e nas perdas de solo, água e nutrientes por erosão, comparados aos monocultivos de soja e milho no 5º ano agrícola após implantação do experimento. A inclusão da braquiária no sistema tem por finalidade prover maior cobertura do solo pela substancial produção de biomassa, impedindo o impacto direto da gota de chuva na superfície e resultando, devido ao vigoroso sistema radicular, em benefícios físicos como a estruturação e agregação do solo, acarretando na otimização do uso da água pelas culturas (BORGHI; CRUSCIOL, 2007; CALONEGO, J C BORGHI, E CRUSCIOL, 2011; CHIODEROLI et al., 2012; CRUSCIOL et al., 2012, 2014; GONTIJO NETO et al., 2018).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Qualidade física do solo

A qualidade física do solo (QFS) é determinada por uma gama de variáveis correlacionadas entre si. A QFS desempenha influência direta nas propriedades químicas e biológicas do solo, deste modo, exerce função central na qualidade do sistema (DEXTER,

2004). Solos com adequada QFS mantêm uma boa estrutura e altas produtividades ao longo do tempo, apresentam alta resistência à erosão, bem como oferecem baixa resistência ao desenvolvimento radicular e à propagação da flora e fauna do solo (REYNOLDS et al., 2002). A deterioração da QFS é expressada de diversas formas e pode ser apurada por meio de indicadores os quais apresentam como causa comum a degradação da estrutura do solo (DEXTER, 2004; RABOT et al., 2018; REYNOLDS et al., 2007).

A estrutura do solo desempenha papel crucial no sistema e é diretamente associada com processos como germinação de sementes, infiltração de água, aeração, desenvolvimento radicular, agregação e suscetibilidade à erosão (RABOT et al., 2018; REYNOLDS et al., 2007). A qualidade estrutural do solo pode ser prejudicada pelas intervenções antrópicas a depender do uso e manejo empregado na área. O aumento da densidade do solo, da resistência mecânica à penetração de raízes e da taxa de escoamento superficial são evidências dessas alterações em solos utilizados para produção agropecuária (LETEY, 1985; REYNOLDS et al., 2007).

A adoção de sistemas conservacionistas torna-se fundamental para a manutenção da qualidade física do solo. O SPD é amplamente adotado em distintas condições geográficas e edafoclimáticas, com aplicabilidade em solos arenosos a muito argilosos, de locais extremamente secos a muito úmidos e de pequenas a grandes propriedades (DERPSCH et al., 2010; KASSAM; FRIEDRICH; DERPSCH, 2018), entretanto, sobretudo em regiões quentes e secas e em solos arenosos, a prática demanda desafios para uma melhor performance, principalmente no que se refere à produção adequada de cobertura vegetal. Dentre os benefícios proporcionados pelo SPD aos sistemas de produção destacam-se a conservação da umidade do solo, controle da erosão, incremento de matéria orgânica e melhorias na qualidade estrutural do solo (BETIOLI JÚNIOR et al., 2012; BLEVINS et al., 1971; CRUSCIOL et al., 2012; DERPSCH et al., 2010; LAL; REICOSKY; HANSON, 2007).

Considerando os fatores que interferem na produtividade e crescimento de plantas, a umidade do solo constitui o fator preponderante (SRAYEDDIN; DOUSSAN, 2009), uma vez que intervém diretamente nos demais atributos físicos do solo (LETEY, 1985). O suprimento adequado de água é essencial para o desenvolvimento sadio de plantas, entretanto, essa propriedade não deve ser avaliada de forma segregada.

O excesso de água no solo pode ser nocivo por limitar o crescimento de raízes pela carência de oxigênio (TOPP et al., 1997). O conteúdo de água do solo apresenta correlação inversa com a aeração e resistência mecânica do solo à penetração de raízes, desta forma, torna-se necessário o estabelecimento de uma faixa de umidade não limitante ao crescimento vegetal,

seja a limitação causada por falta de oxigênio ou impedimento físico ao desenvolvimento radicular (LETEY, 1985).

2.2 Resistividade Elétrica do solo

A mensuração da resistividade elétrica do solo (RES) foi introduzida no ramo da geologia com objetivo de explorar formações geológicas e reservas de petróleo, e, atualmente, tem sido utilizada na ciência do solo devido à sua alta correlação com os atributos e materiais constituintes do solo, os quais podem ser quantificados por meio das propriedades geoeletricas (SAMOUELIAN et al., 2005). A RES pode ser considerada um representante das propriedades físicas do solo (BANTON; SEGUIN; CIMON, 1997), sendo influenciada por diversos fatores como mineralogia, textura, distribuição de poros, conteúdo de água, entre outros (SAMOUELIAN et al., 2005).

A tomografia de resistividade elétrica (TRE) é um método geofísico que pode ser utilizado para monitoramento indireto do conteúdo de água no solo por meio da visualização de imagens de distribuição espacial e temporal da RES (DICK et al., 2018; SRAYEDDIN; DOUSSAN, 2009; ZHOU; SHIMADA; SATO, 2001). O método apresenta vantagens em comparação a estimativas convencionais de umidade do solo por ser um método não destrutivo, evitando alterações na estrutura do solo pela amostragem (DICK et al., 2018; SAMOUELIAN et al., 2005; SRAYEDDIN; DOUSSAN, 2009).

Realiza-se descargas elétricas no solo, de modo a mensurar as diferenças de potenciais e estabelecer a distribuição da resistividade espacialmente e verticalmente ao longo do perfil (SAMOUELIAN et al., 2005). Usualmente, as medições são determinadas por quatro eletrodos: A e B, os quais são utilizados para injeção da corrente elétrica e M e N, os quais são utilizados para leitura das diferenças de potencial (SAMOUELIAN et al., 2005).

A estimação da umidade é conferida pela calibração dos valores de resistividade elétrica em função dos teores de água no solo. De forma geral, os valores de resistividade são mínimos em água e máximos em ar, possibilitando a análise da porosidade e do conteúdo de água no solo (SAMOUELIAN et al., 2005). Trabalhos com aplicação da RES na ciência do solo têm utilizado a Lei de Archie (ARCHIE, 1942) para estimação da umidade e porosidade do solo (DICK et al., 2018; SAMOUELIAN et al., 2005; ZHOU; SHIMADA; SATO, 2001).

2.3 Intervalo Hídrico Ótimo

O termo introduzido por (LETEY, 1985) como faixa de umidade não limitante foi consolidado na literatura brasileira por Silva et al. (1994), tratado como Intervalo Hídrico Ótimo

(IHO). Este parâmetro apresenta robustez para inferência de alterações estruturais causadas pelo manejo do solo, uma vez que compreende fatores além da capacidade de água disponível do solo (CAD), como resistência à penetração de raízes (RP), densidade do solo (Ds) e porosidade de aeração (PA) (SILVA et al., 1994).

A abordagem do IHO permite a avaliação da Ds e do conteúdo de água que proporcionam o irrestrito desenvolvimento das plantas. O IHO possui como limite superior a umidade na capacidade de campo ou a umidade do solo relacionada à uma PA limitante atribuída como 0,10 m³ m⁻³. Já o limite inferior é determinado pela umidade no ponto de murcha permanente ou pela umidade associada a RP considerada crítica, comumente atribuída em valores de 2 e 3 MPa (CHEN; WEIL; HILL, 2014; COLLARES et al., 2006; LEÃO et al., 2006; SILVA et al., 1994).

Com o incremento da Ds, a faixa ótima de desenvolvimento de plantas é limitada por atributos além da CAD, ou seja, PA e RP. A partir de dado valor de Ds pode-se inferir que o desenvolvimento vegetal está limitado por fatores além do conteúdo de água no solo. Caso haja a interseção das linhas representantes de PA e RP, têm-se então um valor de IHO nulo, representando o valor de Ds considerado crítico ao crescimento de plantas, no qual independente do conteúdo de água no solo o desenvolvimento das plantas estará restrito por influência de PA e/ou RP (Silva et al., 1994).

Os trabalhos de (SAFADOUST et al., 2014) e Tormena et al. (1998) confirmaram a maior sensibilidade em detectar alterações de manejo do IHO em detrimento da CAD. Ademais, os mesmos autores apresentaram correlação do IHO com outros atributos do solo como carbono orgânico e textura. (LEÃO et al., 2006) avaliaram a abordagem do IHO em sistemas de pastagem no bioma do Cerrado e concluíram que o IHO foi sensível para detectar alterações em atributos físicos do solo nas camadas superficiais.

A busca por maiores produtividades e conseqüente intensificação dos sistemas produtivos pode alterar os atributos físicos do solo como densidade, CAD, aeração e resistência mecânica à penetração de raízes, o que pode ser avaliado pela abordagem do IHO. Ademais, a diminuição da permeabilidade do solo por modificações estruturais reduz a infiltração e aumenta o escoamento superficial, desencadeando processos erosivos (LETEY, 1985).

2.4 Erosão hídrica

O fenômeno da erosão pode ser subdividido em duas principais classes: erosão natural e erosão acelerada. A erosão natural é um processo intrínseco à gênese do solo e independente da intervenção antrópica. Já a erosão acelerada consiste no processo em que há interferência humana e pode ser ocasionada por diversos fatores como desmatamento, queimadas, uso

intensivo e manejo inadequado do solo utilizado para a produção agropecuária (BLANCO-CANQUI; LAL, 2008). Estima-se que 75 bilhões de toneladas de solo são perdidas anualmente devido a erosão em áreas agrícolas em todo o mundo (FAO, 2016).

Água e vento são os dois principais agentes desencadeadores da erosão, sendo a erosão por água a mais expressiva na degradação do solo em termos globais (BLANCO-CANQUI; LAL, 2008). O escoamento superficial de água no solo ocorre quando a precipitação excede a taxa de infiltração, acarretando em uma lâmina de água sobre o solo que pode entrar em movimento descendente pela força da gravidade, podendo iniciar o processo erosivo. A infiltração de água depende da condição física do solo, principalmente no que se refere à estrutura do solo, distribuição de poros e capacidade de drenagem (LETEY, 1985; PIMENTEL, 2006).

A erosão hídrica é um processo físico e dependente de energia (WISCHMEIER; SMITH, 1958), a qual, no processo de erosão assume as formas de energia potencial e energia cinética (MORGAN, 2005). A energia potencial da chuva é um produto da massa, altura de queda e aceleração da gravidade, e esta é convertida em energia cinética quando inicia-se o movimento (MORGAN, 2005). A colisão das gotas de chuva com a superfície do solo dá origem ao processo. O impacto pode causar a desagregação das partículas e, em condições de declive, o transporte pelo escoamento superficial.

A maior parte da energia cinética contida nas gotas de chuva é dissipada quando há o impacto sobre a superfície do solo, dessa forma, a energia cinética e a capacidade erosiva da precipitação são potencialmente maiores em comparação ao escoamento superficial (MORGAN, 2005). No momento em que a energia cinética da enxurrada não é suficiente para carrear as partículas do solo, ocorre a deposição dos sedimentos, o que pode ser realizado em áreas baixas do terreno ou atingir corpos d'água, causando o assoreamento dos recursos hídricos (BLANCO-CANQUI; LAL, 2008; MORGAN, 2005).

A erosão hídrica é dominante em regiões úmidas, onde os eventos de chuva são frequentes, porém também é severa em regiões áridas e semi-áridas, nas quais o volume restrito de chuvas concentra-se em eventos intensos de alto potencial erosivo (BLANCO-CANQUI; LAL, 2008). O carreamento de partículas pelo escoamento superficial causa a remoção da camada superficial, na qual se concentram os insumos aportados pela prática agrícola, como fertilizantes e defensivos, causando prejuízos financeiros e ambientais pela perda e transporte de nutrientes e defensivos da área cultivada para cursos d'água (BLANCO-CANQUI; LAL, 2008).

As influências da erosão hídrica na degradação do solo podem ser compreendidas em

diversos danos físicos, químicos e biológicos. Podem ser destacados os efeitos físicos como o selamento superficial, compactação, diminuição da macroporosidade do solo e taxa de infiltração, bem como efeitos químicos e biológicos como a eutrofização e poluição de recursos hídricos, acidificação e salinização do solo, diminuição da CEC, diminuição do teor de matéria orgânica do solo, diminuição da biomassa, atividade e diversidade microbiana e aumento da emissão de gases de efeito estufa (BLANCO-CANQUI; LAL, 2008; PANAGOS et al., 2018).

Os efeitos da erosão ocasionam prejuízo direto aos produtores rurais por meio da degradação do solo, sobretudo pela perda de nutrientes, comprometendo a produtividade da área (PANAGOS et al., 2018; PIMENTEL et al., 1995). Além dos danos diretos, há ainda os indiretos como assoreamento e eutrofização de corpos d'água, os quais são pagos pela sociedade (PANAGOS et al., 2018), desta forma, a erosão apresenta não somente ameaça à atividade agrícola e à conservação ambiental como também têm influências socioeconômicas (BORRELLI et al., 2017).

3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Sistemas de produção que promovam o uso racional dos recursos hídricos e priorizem a conservação do solo e da água são fundamentais para o futuro sustentável da atividade agrícola.. A adoção e o manejo adequado de sistemas conservacionistas, sobretudo que forneçam adequada cobertura ao solo, ademais, são cruciais para evitar as perdas de água por escoamento superficial e evaporação, constituindo um fator chave para o incremento da produtividade das culturas, especialmente em locais que pratiquem a agricultura de sequeiro. Diante do exposto, o trabalho objetivou avaliar sistemas de produção de grãos em plantio direto investigando os efeitos de níveis de investimento em fertilizantes e diferentes sistemas de rotação de culturas na qualidade física do solo, no armazenamento de água no solo, nas perdas de solo, água e nutrientes e na produtividade das culturas, comparados à monocultivos de soja e milho no quinto ano agrícola após implantação do NT. A qualidade física do solo foi avaliada por meio do Intervalo Hídrico Ótimo, o armazenamento de água no solo foi avaliado pela técnica da resistividade elétrica do solo e as perdas de solo, água e nutrientes por erosão foram avaliadas por meio do monitoramento em parcelas de escoamento. A hipótese testada foi que a inclusão da braquiária no sistema de rotação promove maior cobertura do solo pela substancial produção de biomassa da gramínea, impedindo o impacto direto da gota de chuva na superfície, resultando em diminuição do escoamento superficial e conseqüente perda de solo por erosão

hídrica, bem como, devido ao vigoroso sistema radicular, promove benefícios físicos como estruturação e agregação do solo, acarretando na otimização do uso da água pelas culturas.

REFERÊNCIAS

ARCHIE, G. E. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. **Trans. AIME** **146**, v. 1, p. 54–62, 1942.

ASMAMAW, D. K. A critical review of the water balance and agronomic effects of conservation tillage under rain-fed agriculture in Ethiopia. **Land Degradation and Development**, v. 855, n. August 2016, p. 843–855, 2017.

BANTON, O.; SEGUIN, M. K.; CIMON, M. A. Mapping Field-Scale Physical Properties of Soil with Electrical Resistivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, p. 1010–1017, 1997.

BECEGATO, V. A.; FERREIRA, F. J. F. Gamaespectrometria, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n. 4, p. 371–405, 2005.

BETIOLI JÚNIOR, E. et al. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um latossolo vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 36, p. 971–982, 2012.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. **Principles of Soil Conservation and Management**. [s.l: s.n.]. 2008.

BLEVINS, R. L. et al. Influence of No-tillage on Soil Moisture. **Agronomy Journal**, p. 1–4, 1971.

BORGHI, E.; CRUSCIOL, C. A. C. Produtividade de milho , espaçamento e modalidade de consorciação com *Brachiaria brizantha* em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 2, p. 163–171, 2007.

BORRELLI, P. et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. **Nature Communications**, v. 8, n. 2013, p. 1–13, 2017.

CALONEGO, J C BORGHI, E CRUSCIOL, C. A. C. Intervalo Hídrico Ótimo e compactação do solo com cultivo consorciado de milho e braquiária. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 35, n. 1, p. 2183–2190, 2011.

CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C. Geoderma Effects of super fi cial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation. **Geoderma**, v. 195–196, p. 234–242, 2013.

CHEN, G.; WEIL, R. R.; HILL, R. L. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. **Soil and Tillage Research**, v. 136, p. 61–69, 2014.

- CHIODEROLI, C. A. et al. Atributos físicos do solo e produtividade de soja em sistema de consórcio milho e braquiária Physycal properties of soil and yield of soybeans in corn braquiaria consortium. p. 37–43, 2012.
- COLLARES, G. L. et al. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 41, n. 11, p. 1663–1674, 2006.
- CRUSCIOL, C. A. C. et al. An innovative crop-forage intercrop system: Early cycle soybean cultivars and palisadegrass. **Agronomy Journal**, v. 104, n. 4, p. 1085–1095, 2012.
- CRUSCIOL, C. A. C. et al. Intercropping soybean and palisade grass for enhanced land use efficiency and revenue in a no till system. **European Journal of Agronomy**, v. 58, p. 53–62, 2014.
- DERPSCH, R. et al. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. **Int J Agric & Biol Eng**, v. 3, n. 1, p. 01-25, 2010.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic mailer, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, p. 201–214, 2004.
- DICK, J. et al. Using repeat electrical resistivity surveys to assess heterogeneity in soil moisture dynamics under contrasting vegetation types. **Journal of Hydrology**, v. 559, p. 684–697, 2018.
- FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 23, n. 1, p. 515–524, 1999.
- GIROTTO, E. M.; SANTOS, I. A. Medidas de resistividade elétrica DC em sólidos: como efetuá-las corretamente. **Química Nova**, v. 25, n. 4, p. 639–647, 2002.
- GOEDERT, W. J. Management of the Cerrado soils of Brazil : a review. **Journal of Soil Science**, v. 34, p. 405–428, 1983.
- GONTIJO NETO, M. M. et al. Benefícios e desafios da integração lavoura-pecuária na melhoria da qualidade dos solos. p. 9–21, 2018.
- IGLESIAS, A.; GARROTE, L. Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe. **Agricultural Water Management**, v. 155, p. 113–124, 2015.
- KASSAM, A.; FRIEDRICH, T.; DERPSCH, R. Global spread of Conservation Agriculture Global spread of Conservation Agriculture. **International Journal of Environmental Studies**, v. 00, n. 00, p. 1–23, 2018.
- KER, J. C. Latossolos do Brasil: Uma revisão. **Geonomos**, v. 5, n. 1, p. 17–40, 1997.
- LAL, R.; REICOSKY, D. C.; HANSON, J. D. Evolution of the plow over 10 , 000 years and the rationale for no-till farming. **Soil & Tillage Research**, v. 93, p. 1–12, 2007.
- LEÃO, T. P. et al. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage**

Research, v. 88, n. 1–2, p. 279–285, 2006.

LETEY, J. Relationship between Soil Physical Properties and Crop Production. **Advances in Soil Science**, v. 1, p. 277–293, 1985.

LOPES, A. S. Solos sob “Cerrado”: Características, propriedades e manejo. **Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisa da Potassa e do Fósforo**, v. 2ª edição, p. 162p, 1984.

LOPES, A. S.; COX, F. R. A Survey of the Fertility Status of Surface Soils Under “Cerrado” Vegetation in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 41, n. April, p. 742–747, 1977.

MORGAN, R. P. C. Soil Erosion & Conservation. **National Soil Resources Institute, Cranfield University**, 2005.

PANAGOS, P. et al. Cost of agricultural productivity loss due to soil erosion in the European Union: From direct cost evaluation approaches to the use of macroeconomic models. **Land Degradation and Development**, v. 29, n. 3, p. 471–484, 2018.

PIMENTEL, D. et al. Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits. **Science**, v. 267, n. February, 1995.

PIMENTEL, D. Soil Erosion: a food and environmental threat. **Environment, Development and Sustainability**, v. 8, p. 119–137, 2006.

RABOT, E. et al. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, v. 314, n. November 2017, p. 122–137, 2018.

REATTO, A. e MARTINS, ES. Classes de solos em relação dos controles da paisagem do Bioma Cerrado. In: **Cerrado: Ecologia, Biodiversidade e Conservação**. 1ª ed. Scariot A, Souza-Silva JC and Felfini JM (Eds), **Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF, Brasil**. [s.l: s.n.]. p. 47–59. 2005.

RESENDE, M. et al. Pedologia: base para distinção de ambientes. **Lavras: Editora UFLA**, v. 5. ed. rev, p. 322 p., 2007.

REYNOLDS, W. D. et al. Indicators of good soil physical quality: Density and storage parameters. **Geoderma**, v. 110, n. 1–2, p. 131–146, 2002.

REYNOLDS, W. D. et al. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. **Soil & Tillage Research**, v. 96, p. 316–330, 2007.

SAFADOUST, A. et al. Least limiting water range as affected by soil texture and cropping system. **Agricultural Water Management**, v. 136, p. 34–41, 2014.

SAMOUELIAN, A. et al. Electrical resistivity survey in soil science : a review. **Soil and Tillage Research**, v. 83, p. 173–193, 2005.

SAMOUËLIAN, A. et al. Electrical resistivity survey in soil science: A review. **Soil and Tillage Research**, v. 83, n. 2, p. 173–193, 2005.

SCHAEFER, C. E. G. R.; FABRIS, J. D.; KER, J. C. Minerals in the clay fraction of

- Brazilian Latosols (Oxisols): a review. **Clay Minerals**, v. 43, p. 137–154, 2008.
- SEVERIANO, E. C. et al. Structural changes in Latosols of the Cerrado region: I - Relationships between soil physical properties and least limiting water range. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 35, n. 5, p. 773–782, 2011.
- SILVA, A. P. et al. Characterization of the Least Limiting Water Range of Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 6, p. 1775–1781, 1994.
- SILVA, A. P.; KAY, B. D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant Soil**, v. 184, p. 323–329, 1996.
- SILVA, B. M. et al. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. **Soil and Tillage Research**, v. 154, p. 103–113, 2015.
- SRAYEDDIN, I.; DOUSSAN, C. Estimation of the spatial variability of root water uptake of maize and sorghum at the field scale by electrical resistivity tomography. **Plant and Soil**, v. 319, n. 1–2, p. 185–207, 2009.
- TOPP, G. C. et al. Chapter 2 Physical attributes of soil quality. **Developments in Soil Science**, v. 25, n. C, p. 21–58, 1997.
- TORMENA, C. A.; DA SILVA, Á. P.; LIBARDI, P. L. Characterization of the Least Limiting Water Range of an Oxisol Under No-Tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 1, p. 573–581, 1998.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. **Transactions American Geophysical Union**, v. 39, n. 2, p. 285–291, 1958.
- ZHOU, Q. Y.; SHIMADA, J.; SATO, A. Three-dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity tomography. **Water Resources Research**, v. 37, n. 2, p. 273–285, 2001.

Segunda parte – Artigos

Artigo I:

Armazenamento de água no solo medido pela resistividade elétrica em um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto

Artigo formatado nas normas da Revista Agricultural Water Management (versão preliminar)

Resumo

Os sistemas de produção agrícola têm o atual desafio de atingir altas produtividades otimizando o uso da água pelas culturas. Práticas que resultem no aumento da infiltração, do armazenamento de água no solo e do aprofundamento das raízes das plantas são fundamentais para a manutenção de altas produtividades em locais que pratiquem a agricultura de sequeiro. Os objetivos deste trabalho foram avaliar a dinâmica espaço-temporal do conteúdo de água no solo (θ) por meio da técnica da tomografia de resistividade elétrica (ρ) em sistemas de produção de grãos avaliando monocultivos, rotação de culturas e consórcio com capim-braquiária bem como testar dois modelos (logarítmico e potencial) para representar a relação conteúdo de água - resistividade elétrica em um Latossolo Vermelho distrófico típico muito argiloso de estrutura granular. As medições foram feitas em três períodos de modo a representar a estação chuvosa e as épocas de seca na região. A técnica de tomografia de resistividade elétrica provou ser adequada para monitoramento da variação temporal do conteúdo de água no solo bem como para inferir a respeito da absorção de água pelas plantas em um Latossolo Vermelho distrófico típico. O modelo potencial mostrou-se adequado para representar a relação θ - ρ e as tomografias indicam a indisponibilidade de água para as plantas durante o período de inverno para a região estudada. O sistema de rotação com braquiária e alto investimento em fertilizantes apresentou a maior cobertura do solo e maior umidade do solo na época chuvosa. O severo período de estiagem limitou a produtividade da soja e o milho foi favorecido quando em sistemas mais diversificados.

Palavras-chave: técnicas geofísicas, umidade do solo, rotação de culturas

Abstract

Agricultural production systems face the current challenge of achieving high yield by optimizing water use by crops. Practices that result in increased infiltration, water storage and deeper root development are fundamental for maintaining high yield in regions that practice rainfed agriculture. The main objective of this study was to evaluate the spatio-temporal dynamics of soil water content (θ) by the electrical resistivity (ρ) tomography technique in grain production systems by evaluating monocultures, crop rotation and intercropping with brachiaria grass. Two models (logarithmic and power) were tested to represent the water content - electrical resistivity relationship in a very clayey Oxisol with granular structure. The measurements were made in three periods in order to represent the rainy season and the dry seasons in the experimental site. The electrical resistivity tomography technique proved to be adequate for monitoring the temporal variation of soil water content as well as for inferring about the water absorption by the plants in a very weathered tropical Oxisol. The potential model proved to be adequate to represent the θ - ρ relationship and the images indicate the unavailability of water for plants during the winter period for the studied region. The crop rotation system with brachiaria and high investment in fertilizers showed the highest soil cover rate and the highest soil moisture in the rainy season. The severe drought period limited soybean productivity and maize was favored when in more diversified systems.

Keywords: geophysical techniques, soil moisture, crop rotation

1. Introdução

O incremento da população global aliado ao cenário de mudanças climáticas torna a disponibilidade de água um fator crucial a ser estudado. Projeções recentes apontam que grande parte da população mundial será afetada pela escassez hídrica nas próximas décadas (Mancosu et al., 2015). Ademais, o estresse hídrico é o principal fator limitante para as culturas agrícolas (Silva et al., 2019; I Srayeddin and Doussan, 2009), desta forma, a disponibilidade de água influencia, além da capacidade de suprimento de água potável, a segurança alimentar da humanidade.

A condição de escassez hídrica requer manejo criterioso e os sistemas agrícolas de produção têm o atual desafio de atingir altas produtividades otimizando o uso de água pelas culturas (I Srayeddin and Doussan, 2009). A baixa disponibilidade de água decorrente da sazonalidade de chuvas pode ser acentuada caso haja degradação da estrutura do solo, comprometendo sua qualidade física (Safadoust et al., 2014). A qualidade física do solo determina a capacidade de infiltração de água bem como a percolação e retenção de água no perfil assim como sua disponibilidade para a planta. Práticas que resultem no aumento da infiltração e do armazenamento de água no solo para atender a demanda vegetal, bem como promovam o aprofundamento radicular para permitir o acesso das plantas à umidade em camadas mais profundas são essenciais para o êxito da produção (Carducci et al., 2013; Cherubin et al., 2016; Dexter, 2004; Silva et al., 2015). A adoção e o manejo adequado de sistemas conservacionistas, sobretudo que forneçam adequada cobertura ao solo, ademais, são cruciais para evitar as perdas de água por escoamento superficial e evaporação, constituindo um fator chave para o incremento da produtividade das culturas, especialmente em locais que pratiquem a agricultura de sequeiro (Asmamaw, 2017; Dexter, 2004).

O conteúdo de água no solo (θ) é fonte primária de água para as plantas controlando seu crescimento (Dick et al., 2018) e sua dinâmica se relaciona com aspectos pedológicos, como textura e estrutura (Silva et al., 2015), e processos hidrológicos como precipitação, escoamento e infiltração, entre outros, portanto conectados a padrões espaciais e temporais que aumentam/diminuem sua variabilidade (Beff et al., 2013). A distribuição do θ no perfil do solo é substancialmente afetado pelas culturas, pela interceptação da chuva pelo dossel, absorção de água pelas raízes e poros criados pelas raízes induzindo fluxo preferencial (Beff et al., 2013). No entanto, a avaliação espaço-temporal do θ é desafiador, sobretudo nos países em

desenvolvimento, os quais carecem ainda de instrumentos com custo acessível e exatidão aceitável.

Técnicas geofísicas têm provado ao longo das últimas décadas serem métodos eficazes para a estimativa do conteúdo de água no solo e monitoramento das interações solo-raiz (Dick et al., 2018; Vanella et al., 2018). A tomografia de resistividade elétrica (ERT) é considerada uma das técnicas geofísicas mais adequadas para estudos na área das ciências agrárias e ambientais (Vanella et al., 2018) e fornece informações relevantes para o melhor entendimento da dinâmica da água no solo, como processos de redistribuição e absorção pelas raízes das plantas (Binley et al., 2015). A técnica pode ser utilizada para monitoramento indireto do conteúdo de água no solo por meio da visualização de imagens da distribuição espacial e temporal (*time-lapse*) da resistividade elétrica do solo (RES) (Dick et al., 2018; I Srayeddin and Doussan, 2009; Zhou et al., 2001). Trabalhos têm obtido sucesso na estimativa do conteúdo de água no solo utilizando imagens 2D (Ain-lhout et al., 2016; Brunet et al., 2010).

O método da ERT apresenta vantagens em comparação a estimativas convencionais de umidade do solo por ser um método não destrutivo, evitando alterações na estrutura do solo pela amostragem (Dick et al., 2018; Samouelian et al., 2005; I Srayeddin and Doussan, 2009). De forma geral, os valores de resistividade são mínimos em água e máximos em ar, possibilitando a análise da porosidade e do conteúdo de água no solo (Samouelian et al., 2005). Trabalhos com aplicação da ERT na ciência do solo têm utilizado a Lei de Archie (Archie, 1942) para estimação da umidade e porosidade do solo (Dick et al., 2018; Samouelian et al., 2005; Zhou et al., 2001). A estimativa da umidade é conferida pela calibração dos parâmetros de resistividade elétrica em função dos teores de água no solo, os quais podem ser obtidos nas prospecções em campo (Zhou et al., 2001) ou em laboratório (Brunet et al., 2010; Calamita et al., 2012; Samouelian et al., 2005). O trabalho de Calamita et al. (2012) reporta diversos modelos utilizados na literatura para calibrar a relação entre conteúdo de água (θ) e resistividade elétrica do solo (ρ).

Diversos trabalhos têm sido realizados para avaliação da qualidade do solo por meio de tomografias de resistividade elétrica para o monitoramento da umidade do solo e inferência acerca da absorção de água pelas raízes (RWU) (Ain-lhout et al., 2016; Brunet et al., 2010; Dick et al., 2018; Ma et al., 2014; I Srayeddin and Doussan, 2009) bem como para avaliar compactação (Besson et al., 2004; Garcíá-Tomillo et al., 2018; Jeřábek et al., 2017; Ranjy Roodposhti et al., 2019), em sua maioria, estudando solos de clima temperado. Srayeddin and

Doussan (2009) validaram a estimativa da RWU por meio das variações de ρ , comparando-as com balanço hídrico para milho e sorgo, assim como (Beff et al., 2013) também para milho. Outros trabalhos, por meio da correlação com o potencial hídrico foliar (Consoli et al., 2017), transpiração da planta (Vanella et al., 2018) e distribuição do sistema radicular (Beff et al., 2013; Michot et al., 2003).

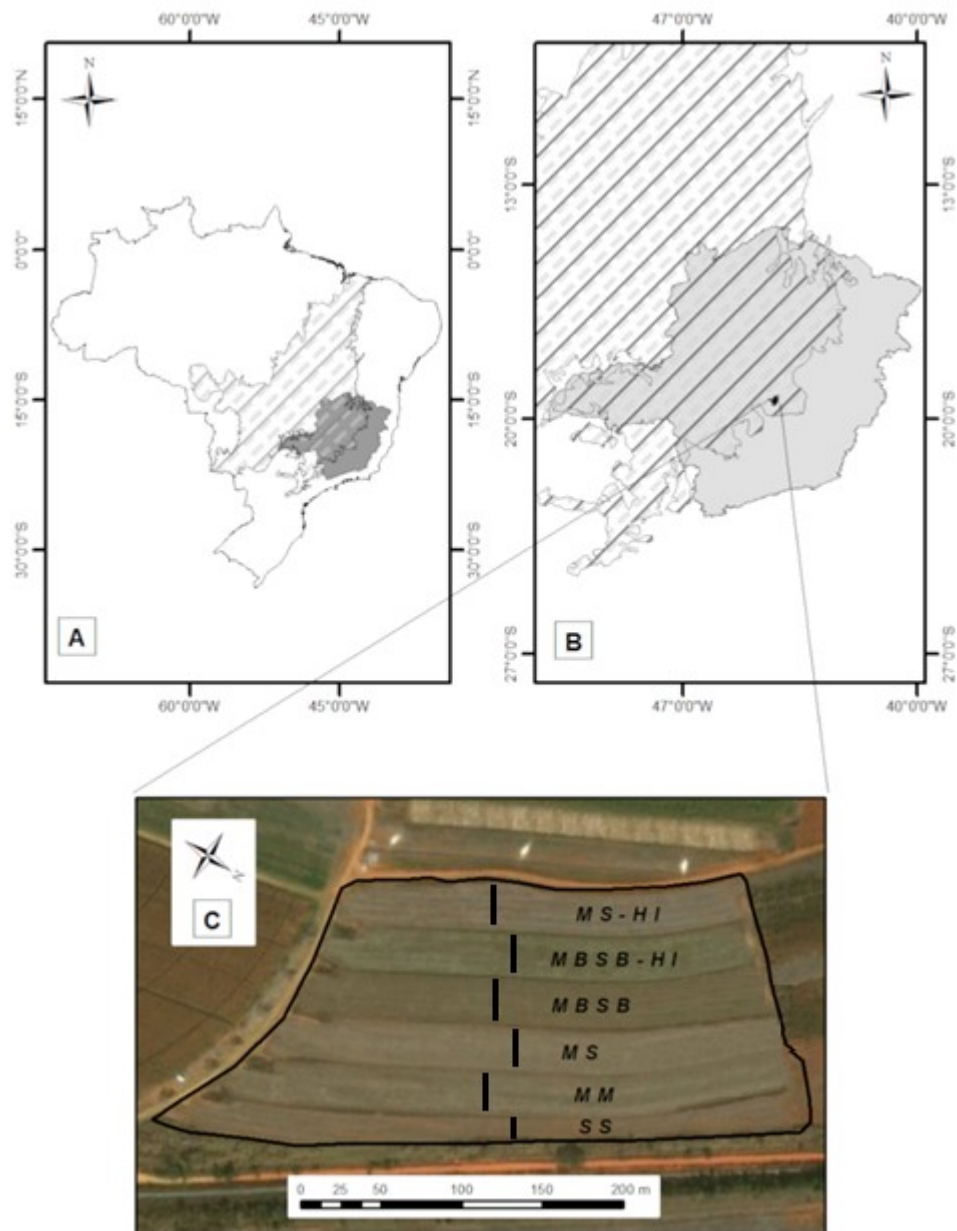
Este estudo foi conduzido para testar a hipótese de que sistemas de produção de grãos intensificados pela sucessão de milho ou soja com capim braquiária, devido ao aumento de cobertura vegetal, podem afetar os padrões espaço-temporais de θ e a produtividade vegetal, sob condições de chuvas mal distribuídas. Os objetivos deste trabalho foram; (i) avaliar o potencial da técnica ERT para quantificar a variabilidade espaço-temporal do conteúdo de água em um solo tropical muito intemperizado de estrutura granular, (ii) a alteração dessa variabilidade devido a adoção de sistemas intensificados de produção de grãos em condição de sequeiro por meio de mapas 2-D *time-lapse* de ρ e (iii) Dois modelos (logarítmico e potencial) para a relação θ - ρ foram testados inicialmente quanto a sua performance para a estimativa do θ no solo tropical estudado.

2. Material e Métodos

2.1 Área experimental

O trabalho foi conduzido em área experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) – Centro Nacional de Pesquisa em Milho e Sorgo, localizada no município de Sete Lagoas, Minas Gerais, coordenadas geográficas 19°28'30'' S, 44°15'08'' W (Figura 1). O clima predominante na região conforme classificação de Köppen é subtropical úmido (Cwa), apresentando temperatura média anual de 22,1 °C e pluviosidade média anual de 1.382,7 mm, com regime de chuvas irregular, mal distribuídas ao longo do ano, concentrando-se no período de outubro a abril. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (Santos et al., 2013), correspondente a Typic Haplustox (Soil Survey Staff, 2014) de mineralogia composta majoritariamente por caulinita e gibbsita (Galvão and Schulze, 1996) e textura muito argilosa, constituído por 190, 120 e 690 g kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente.

Figura 1. Bioma Cerrado e estado de Minas Gerais no território brasileiro (A), Município de Sete Lagoas na região central de Minas Gerais (B) e área experimental (C).



Legenda: SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária e HI = alto investimento em fertilizantes. Linhas de cor preta transversais às faixas de cultivo representam os transectos para avaliação da resistividade elétrica do solo.

O experimento foi instalado no mês de julho de 2014 em condições de sequeiro e está disposto em faixas paralelas de dimensões iguais totalizando uma área de 4,4 hectares e 1100 m de perímetro. Anteriormente à implantação do experimento a área foi utilizada para produção de milho e soja em sistema convencional de preparo do solo por mais de duas décadas. Foram realizadas operações de mobilização do solo com escarificador a 25 cm de profundidade, de

modo a romper camadas compactadas. Realizou-se aplicações de calcário na dose de 4 t ha⁻¹ parceladas em duas operações, sendo a primeira incorporada com arado de aiveca e a segunda utilizando grade aradora. Também foi realizada aplicação de gesso agrícola na dose de 3 t ha⁻¹. Após dessecação da área foi adotado o sistema de plantio direto (NT) para todos os cultivos seguintes.

2.2 Sistemas de manejo do solo

Foram avaliados 6 tratamentos (Figura 1), os quais se diferem pelo sistema manejo, todos em NT. Foram testados diferentes sistemas da rotação de culturas e investimento em fertilidade do solo como forma de melhorar a produção de palhada do NT, melhoria da qualidade física do solo e aumento de produtividade de grãos.

Na Tabela 1 estão descritos os tratamentos no decorrer dos anos desde a implantação do experimento. Monocultivos de soja (SS) e milho (MM) foram comparados às práticas de rotação de culturas (MS e MBSB). A sucessão das culturas de grãos com o capim braquiária semeado de forma consorciada também está presente em MBSB. Adicionalmente, foram avaliados diferentes níveis de investimento em fertilidade do solo nos sistemas de rotação, sendo tratamentos de médio investimento contrastados com tratamentos de alto investimento (HI), estipulados para atender os padrões técnicos adequados e disponibilidade de investimento dos produtores.

Tabela 1. Manejo do solo em cada ano agrícola em um Latossolo Vermelho distrófico típico no município de Sete Lagoas-MG. As safras 2016/2017 e 2017/2018 configuram os mesmos tratamentos que 2014/2015 e 2016/2017, respectivamente.

| Manejo do solo | Nível de investimento em fertilizantes | Safra | Safra | ... | Safra | Período entressafra |
|----------------|--|--------------------|--------------------|-----|--------------------|---------------------|
| | | 2014/2015 Verão | 2015/2016 Verão | | 2018/2019 Verão | Outono-Primavera |
| SS | Médio | Soja | Soja | | Soja | Pousio |
| MM | Médio | Milho | Milho | | Milho | Pousio |
| MS | Médio | Milho | Soja | | Milho | Pousio |
| MBSB | Médio | Milho+braquiária | Soja+braquiária | | Milho+braquiária | Braquiária |
| MBSB-HI | Alto | Soja+braquiária | Milho+Braquiária | | Soja+braquiária | Braquiária |
| MS-HI | Alto | Soja | Milho | | Soja | Pousio |

SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho-soja, MBSB = rotação milho-braquiária-soja-braquiária, HI = alto investimento em fertilizantes.

Para a safra 2018/2019, principal objeto de estudo deste trabalho, foram semeadas as cultivares RK 5813 RR (soja) e AG 8088 Pro2 (milho) consistindo em 320.000 e 61.000 sementes por hectare, respectivamente. O milho foi semeado em espaçamento de 70 cm e a soja em espaçamento de 50 cm entre as linhas de cultivo. A adubação consistiu em suprir totalmente as demandas nutricionais das culturas, caracterizando o nível de médio de investimento, e para o alto investimento, além do suprimento total da demanda das plantas, adubação suplementar considerando a exportação na colheita. Os níveis de investimento em fertilizantes são fundamentados nas recomendações de Resende et al. (2016) para elevadas produtividades de grãos de milho e soja. Foram utilizados 148, 250, 250, 250, 415 e 415 kg ha⁻¹ de NPK 08-28-16 + 0,3% de boro e 2,1% de enxofre para os tratamentos SS, MM, MS, MBSB, MBSB-HI e MS-HI, respectivamente. Os resultados da análise química do solo antes do plantio dos tratamentos em 2018 estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização química e física de um Latossolo Vermelho distrófico típico no município de Sete Lagoas-MG para cada tratamento antes da semeadura da safra de 2018/2019 (continua).

| Manejo do solo | Profundidade (m) | | | | | |
|---------------------------------------|------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| | 0 - 0,10 | | | | | |
| | SS | MM | MS | MBSB | MBSB-HI | MS-HI |
| Tp (m ³ m ⁻³) | 0,58 | 0,56 | 0,56 | 0,62 | 0,59 | 0,54 |
| FC (m ³ m ⁻³) | 0,40 | 0,41 | 0,41 | 0,38 | 0,39 | 0,44 |
| PWP (m ³ m ⁻³) | 0,31 | 0,29 | 0,31 | 0,28 | 0,29 | 0,31 |
| OC (g kg ⁻¹) | 15,60 | 16,80 | 15,90 | 14,70 | 16,30 | 16,10 |
| pH (H ₂ O) | 5,94 | 5,61 | 5,72 | 5,62 | 6,02 | 6,39 |
| pH (CaCl ₂) | 5,39 | 4,96 | 5,06 | 5,02 | 5,42 | 5,86 |
| P (mg dm ⁻³) | 19,43 | 38,01 | 30,62 | 26,50 | 12,48 | 29,86 |
| K (mg dm ⁻³) | 180,02 | 183,05 | 190,35 | 192,12 | 206,56 | 212,24 |
| S (mg dm ⁻³) | 3,61 | 3,15 | 3,76 | 4,06 | 4,55 | 3,61 |
| Ca (cmolc dm ⁻³) | 4,26 | 3,22 | 3,97 | 3,61 | 3,74 | 4,26 |
| Mg (cmolc dm ⁻³) | 1,31 | 0,92 | 0,96 | 1,10 | 1,05 | 1,09 |

| | | | | | | |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| B (mg dm ⁻³) | 0,43 | 0,40 | 0,62 | 0,49 | 0,59 | 0,61 |
| Cu (mg dm ⁻³) | 0,75 | 0,77 | 1,01 | 0,93 | 0,72 | 0,86 |
| Fe (mg dm ⁻³) | 25,01 | 28,25 | 29,16 | 28,80 | 24,15 | 23,02 |
| Mn (mg dm ⁻³) | 46,04 | 44,58 | 52,61 | 57,35 | 59,99 | 67,87 |
| Zn (mg dm ⁻³) | 22,72 | 79,52 | 27,96 | 26,21 | 14,04 | 24,80 |
| Al (cmolc dm ⁻³) | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 |
| H + Al (cmolc dm ⁻³) | 3,69 | 5,20 | 4,84 | 5,28 | 4,57 | 3,45 |
| CEC (cmolc dm ⁻³) | 9,73 | 9,82 | 10,28 | 10,48 | 9,91 | 9,35 |
| V (%) | 61,60 | 47,30 | 52,80 | 49,60 | 53,67 | 61,64 |
| m (%) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Profundidade (m)

0,10 - 0,20

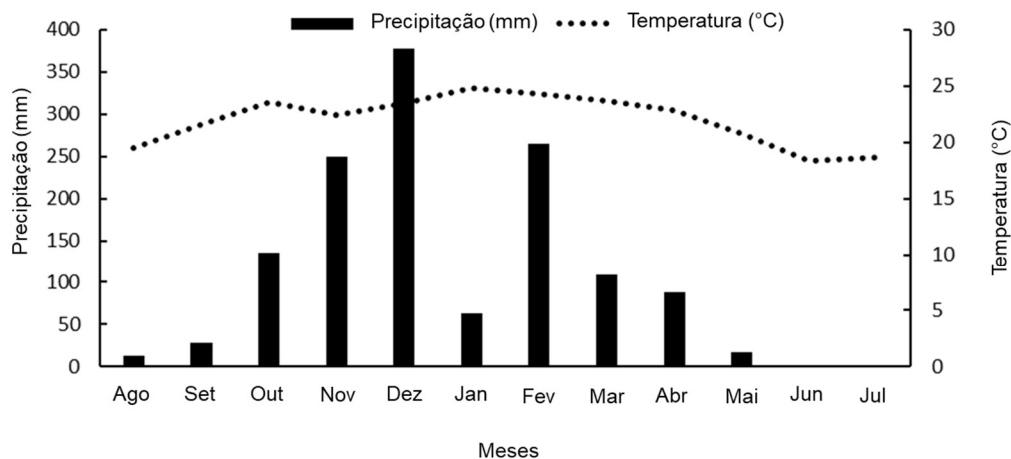
| | | | | | | |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Tp (m ³ m ⁻³) | 0,57 | 0,58 | 0,56 | 0,56 | 0,58 | 0,57 |
| FC (m ³ m ⁻³) | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,43 | 0,41 | 0,41 |
| PWP (m ³ m ⁻³) | 0,31 | 0,29 | 0,27 | 0,30 | 0,29 | 0,31 |
| pH (H ₂ O) | 5,68 | 5,57 | 5,47 | 5,44 | 5,57 | 5,89 |
| pH (CaCl ₂) | 5,11 | 4,98 | 4,83 | 4,82 | 4,95 | 5,33 |
| P (mg dm ⁻³) | 11,32 | 12,45 | 13,09 | 12,59 | 7,10 | 10,79 |
| K (mg dm ⁻³) | 120,10 | 106,78 | 155,69 | 170,10 | 138,30 | 153,52 |
| S (mg dm ⁻³) | 5,68 | 6,05 | 6,41 | 6,21 | 6,59 | 5,75 |
| Ca (cmolc dm ⁻³) | 3,97 | 4,06 | 4,32 | 3,99 | 3,74 | 5,08 |
| Mg (cmolc dm ⁻³) | 1,08 | 0,95 | 0,93 | 0,87 | 0,86 | 1,26 |
| B (mg dm ⁻³) | 0,38 | 0,44 | 0,50 | 0,69 | 0,71 | 0,64 |
| Cu (mg dm ⁻³) | 0,77 | 0,80 | 0,90 | 0,83 | 0,68 | 0,69 |
| Fe (mg dm ⁻³) | 30,01 | 33,01 | 37,09 | 30,81 | 25,39 | 21,92 |
| Mn (mg dm ⁻³) | 37,59 | 44,11 | 53,00 | 59,74 | 52,46 | 62,60 |
| Zn (mg dm ⁻³) | 8,81 | 27,01 | 10,18 | 11,78 | 6,63 | 11,62 |
| Al (cmolc dm ⁻³) | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 |
| H + Al (cmolc dm ⁻³) | 4,89 | 5,12 | 5,40 | 5,50 | 4,84 | 4,23 |
| CEC (cmolc dm ⁻³) | 10,25 | 10,39 | 11,04 | 10,82 | 9,79 | 10,97 |
| V (%) | 51,60 | 51,00 | 51,20 | 49,22 | 50,60 | 61,45 |
| m (%) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Tp = Porosidade total, FC = Capacidade de campo, PWP = Ponto de murcha permanente, OC = Carbono orgânico, SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária e HI = alto investimento em fertilizantes. Linhas de cor preta transversais às faixas de cultivo representam os transectos para avaliação da resistividade elétrica do solo.

2.3 Prospecção geofísica

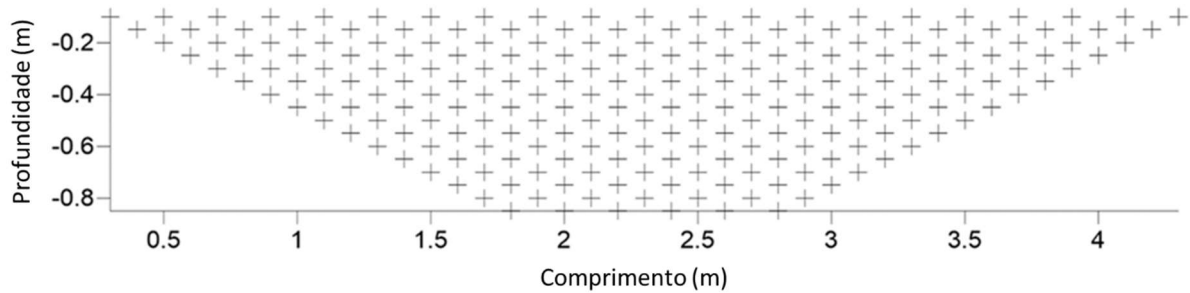
A medição da resistividade elétrica aparente do solo foi realizada na área experimental em três ocasiões: duas no período da seca, durante a entressafra (julho/2018 e julho/2019) e uma no período chuvoso, no fim da safra de verão (março/2019). A medição objetiva avaliar a umidade volumétrica no perfil do solo e assim o armazenamento de água em função do tempo, para cada tratamento. Na região, a segunda safra ou safrinha não tem sido realizada, justificado dentre outros pela baixa disponibilidade de água armazenada no solo. A precipitação pluvial no período de avaliação da resistividade elétrica é apresentada na Figura 2.

Figura 2. Precipitação mensal acumulada e temperatura média para o município de Sete Lagoas – MG no período de agosto de 2018 a julho de 2019.



Os dados de resistividade elétrica do solo foram obtidos por meio de Resistímetro X5xtal 250 Auto Energia, com auxílio de dois multímetros. As medições foram conduzidas em arranjo dipolo-dipolo conforme metodologia descrita por Samouëlian et al. (2005), com espaçamento de 20 cm entre os eletrodos, os quais foram dispostos transversais à faixa de cultivo. A profundidade avaliada foi de 0 a 0,8 m, com uma densidade de medidas por área de 130/m², sendo realizadas 216 leituras por tratamento em cada época. O grid de pontos com dados observados nas medições de resistividade elétrica do solo a campo está exemplificado na Figura 3.

Figura 3. Grid de pontos para mensuração da resistividade elétrica do solo usado em cada tratamento.



A resistividade elétrica aparente do solo (ρ) foi calculada conforme a equação 1, como se segue:

$$\rho = [\pi n(n + 1)(n + 2)a](\Delta V / I) \quad (1)$$

onde ρ é resistividade elétrica aparente do solo ($\Omega \text{ m}$); a é o espaçamento entre eletrodos (m); n é o fator de espaçamento (nível); ΔV diferença de potencial devido a aplicação de corrente elétrica pelo resistivímetro (mV); e I é a corrente elétrica injetada pelo resistivímetro (mA).

2.4 Conversão do conteúdo de água no solo e análise dos dados

Para a conversão da resistividade elétrica em conteúdo de água volumétrico do solo (θ) foi realizada a calibração em laboratório separadamente para cada tratamento, por meio de ajuste de equação empírica dos valores de θ em função de resistividade elétrica (Calamita et al., 2012; Samouelian et al., 2005). Para tanto, amostras indeformadas de solo foram coletadas em cada tratamento, por meio de cilindros de material de isolante (PVC), em duas profundidades (0-10, 20-30 cm). Em laboratório as amostras foram saturadas e submetidas secagem ao ar, com leituras periódicas e posterior secagem em estufa a 105-110 °C para obtenção da massa seca de solo. Ao longo dessa variação de umidade do solo, foram realizadas leituras com o resistivímetro e simultaneamente pesagens para cálculo da θ . De posse da equação de calibração, os valores de resistividade foram convertidos em θ , para cada tratamento.

O experimento de calibração foi conduzido em arranjo Wenner (Samouelian et al., 2005), unidimensional, com quatro eletrodos dispostos na ordem A M N B, sendo A e B os eletrodos de injeção de corrente e M e N eletrodos para a leitura das diferenças de potencial

obtidas. Os eletrodos foram dispostos com espaçamento 1,9 cm entre si e inseridos a profundidade de 5,0 cm m do solo. Três leituras foram realizadas uma vez por dia durante 25 dias consecutivos. A resistividade elétrica da água foi considerada constante durante o processo. A ρ foi calculada de acordo com a equação 2:

$$\rho = 2\pi a(\Delta V/I) \quad (2)$$

onde ρ é resistividade elétrica aparente do solo (Ω m); a é o espaçamento entre eletrodos (m); ΔV diferença de potencial devido a aplicação de corrente elétrica pelo resistivímetro (mV); e I é a corrente elétrica injetada pelo resistivímetro (mA).

Para o ajuste da equação de calibração foram testados dois modelos: logarítmico (3) e potencial (4), segundo as equações:

$$\theta = a + b \log(\rho) \quad (3)$$

$$\theta = a \rho^b \quad (4)$$

onde θ é o conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$), ρ é a resistividade elétrica do solo (Ω m) e a e b são os parâmetros de ajuste do modelo.

Para a seleção do melhor modelo para cada tratamento, calculou-se os parâmetros R^2 , raiz do erro quadrático médio (RMSE), erro médio absoluto (MAE) e critério de informação de Akaike (AIC) para avaliar a exatidão de cada modelo. A modelagem foi realizada utilizando o programa RStudio 3.6.1 (R Development Core Team, 2019).

Os dados de resistividade aparente foram invertidos utilizando o programa Res2Dinvx64 versão 4.8.21, de modo a calcular os valores reais de resistividade conforme (Besson et al., 2004; Binley et al., 2015; Dick et al., 2018; Zhou et al., 2001). Para análise da variabilidade espacial e em profundidade da resistividade elétrica e do conteúdo de água no solo, imagens em 2D foram geradas (Dick et al., 2018; Samouelian et al., 2005; Srayeddin and Doussan, 2009) por meio do programa Surfer 13.5.583 (64-bit) Golden Software e do programa QGIS 3.10.0. O método B-Spline Multinível foi utilizado para a interpolação dos pontos. Dessa forma foram apresentados mapas 2D para visualização da variação do θ em profundidade e lateralmente no solo em cada tratamento. Para melhorar a análise/interpretação da mudança de armazenamento de água entre os períodos avaliados, foi feita a diferença relativa percentual

entre os mapas de cada data de avaliação, como expresso por Ma et al. (2014) como $[(\rho_{n+1} - \rho_n) / \rho_n] \times 100$, onde ρ_{n+1} e ρ_n representam, respectivamente, o grid de pontos dos períodos de análise final e inicial que foram submetidos à álgebra dos mapas de ρ e depois θ , após calibração.

2.5 Amostragem de plantas e cobertura morta

A quantidade de resíduos que compõe a cobertura vegetal morta sobre o solo e a produtividade das culturas foi caracterizada em cada tratamento (Tabela 3). Para a cobertura morta sobre o solo a amostragem foi realizada por meio da coleta manual dos resíduos em 1,0 m², com três replicatas. As amostras foram submetidas a secagem em estufa a 65°C por 48 horas, de modo a mensurar a biomassa seca residual na superfície do solo. A produtividade das culturas (Mg ha⁻¹) foi quantificada por meio de amostragens em 5 pontos na área experimental realizada com colhedora mecanizada de parcelas experimentais.

Tabela 3. Cobertura morta do solo e produtividade de grãos de milho e soja para diferentes manejos do solo em um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas - MG. SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária e HI = alto investimento em fertilizantes.

| Manejo do solo | Cobertura (Mg ha ⁻¹) | Produtividade (kg ha ⁻¹) |
|----------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| SS | 1,22 | 1.476 (Soja) |
| MM | 1,75 | 6.019 (Milho) |
| MS | 1,50 | 7.451 (Milho) |
| MBSB | 3,55 | 8.255 (Milho) |
| MBSB-HI | 4,65 | 1.777 (Soja) |
| MS-HI | 2,43 | 1.883 (Soja) |

A caracterização da atividade das raízes das culturas foi avaliada pelo método indireto da absorção de rubídio, proposto por Olibone et al. (2008) e utilizado por Pivetta et al. (2011) e Rosolem e Pivetta (2017). Foram preparados 162,0 mL de solução de RbNO₃ na concentração de 0,35 mol L⁻¹ para aplicação nas plantas-teste. A aplicação foi realizada, para cada tratamento, em 3 profundidades do solo (5, 15 e 40 cm) e com distância lateral de 5 cm do caule da planta. A avaliação foi realizada no período de florescimento das culturas, correspondente aos estágios fenológicos R1 do milho (pendoamento) e R2 da soja (pleno florescimento).

Foram aplicados 3,0 mL da solução em cada planta com auxílio de uma seringa, de mesmo volume, e de um cateter para inserção em profundidade no solo. Foram feitas aberturas no solo para aplicação da solução, nas profundidades adotadas, com auxílio de trado tipo calador. Cinco dias após a aplicação da solução as plantas teste foram coletadas, bem como para cada repetição foi amostrada uma planta testemunha, na qual não foi aplicada a solução de RbNO_3 . A umidade gravimétrica do solo no momento de aplicação foi determinada em laboratório conforme Teixeira et al. (2017). Foram coletadas e avaliadas a parte aérea total das plantas, conforme sugerido por Olibone et al. (2008). Após a coleta, as plantas teste foram destinadas à secagem em estufa de ventilação forçada a 65°C . As amostras foram pesadas para obtenção da matéria seca da parte aérea e posteriormente foram submetidas a moagem. Após a moagem e homogeneização do material, amostras foram retiradas para análise do conteúdo de Rb absorvido pelo método da espectrofotometria de emissão ótica em plasma induzido (ICP).

3. Resultados e Discussão

3.1 *Imagens temporais de resistividade elétrica (ρ) em função do sistema de manejo*

Os mapas 2-D de resistividade elétrica (ρ) resultantes da ERT para cada tratamento nos três períodos de avaliação estão apresentados na Figura 4. Destacam-se os altos valores de resistividade encontrados, sobretudo na época seca (julho de 2018 e julho de 2019). O padrão de aumento da ρ em períodos do ano com menor precipitação pluvial em relação aos de maior é igualmente observado em outros trabalhos com avaliações temporais em condições sem e com irrigação (Consoli et al., 2017; Ma et al., 2014; Srayeddin and Doussan, 2009; Vanella et al., 2018), provavelmente impulsionado pela dinâmica do conteúdo de água no solo (θ) basicamente devido aos processos de redistribuição da água no solo e absorção pela planta.

Na análise de julho de 2018, a última chuva ocorreu em 19 de março, com 17 mm de precipitação acumulada diária. Portanto, um período superior a 100 dias sem ocorrência de precipitação na região. A análise de março de 2019 foi realizada nos dias 12 e 13 e nos dias anteriores houve precipitação de 29 mm dia 02/03 e 8 mm dia 06/03, portanto, nos dias em que se realizou a análise já haviam passados 5 dias sem precipitação significativa e com altas temperaturas durante o dia, próximas aos 30°C . A análise de julho de 2019 foi realizada nos dias 8 e 9 e a última chuva significativa foi registrada no dia 15/05 com 14 mm acumulados. Os dados de precipitação referem-se à estação instalada na fazenda experimental disponível em INMET (2019) para o município de Sete Lagoas-MG.

Observa-se alta heterogeneidade nos perfis em períodos de menor precipitação pluvial e conseqüente menor θ , e por outro lado imagens mais homogêneas no período úmido. Essa relação direta entre heterogeneidade nos mapas de ρ em período com menor umidade do solo foi identificada por Srayeddin and Doussan (2009). Desta forma, infere-se que a avaliação da estrutura do solo nas condições do presente estudo deve ser realizada em épocas de baixo θ , como no mês de julho para o presente estudo. Esta inferência baseia-se no princípio que o principal mecanismo responsável pela condução de corrente elétrica no solo é eletrolítico, desta forma, o conteúdo de água no solo apresenta influência majoritária nos valores mensurados de resistividade (Samouëlian et al., 2005). Períodos de baixo θ , portanto, possibilitam a análise de outros fatores além do θ , como a estrutura do solo.

Os altos valores de ρ encontrados em pontos das imagens nos períodos de solo seco reforçam a alta porosidade inerente aos Latossolos muito argilosos de estrutura granular, que se apresenta acima de $0,50 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ mesmo sob intenso processo produtivo agrícola (Peixoto et al., 2019; Serafim et al., 2019). Entretanto, observa-se pontos de baixa resistividade nas épocas secas na camada superficial do solo. Tal fato pode estar associado à compactação superficial comum a lavouras em estágio inicial de plantio direto (Peixoto et al., 2019; Reichert et al., 2016). Os resultados obtidos pelas imagens de resistividade podem ser relacionados à proposta de diagnóstico de compactação formulada por Peixoto et al. (2019), trabalho no qual os autores sugerem que o diagnóstico da compactação por meio da resistência do solo à penetração deva ser realizado em condições de solo mais seco, dado que em condições de solo úmido a condição da estrutura do solo é “diluída”, ou seja, não expressa eventuais diferenças existentes entre diferentes manejos do solo.

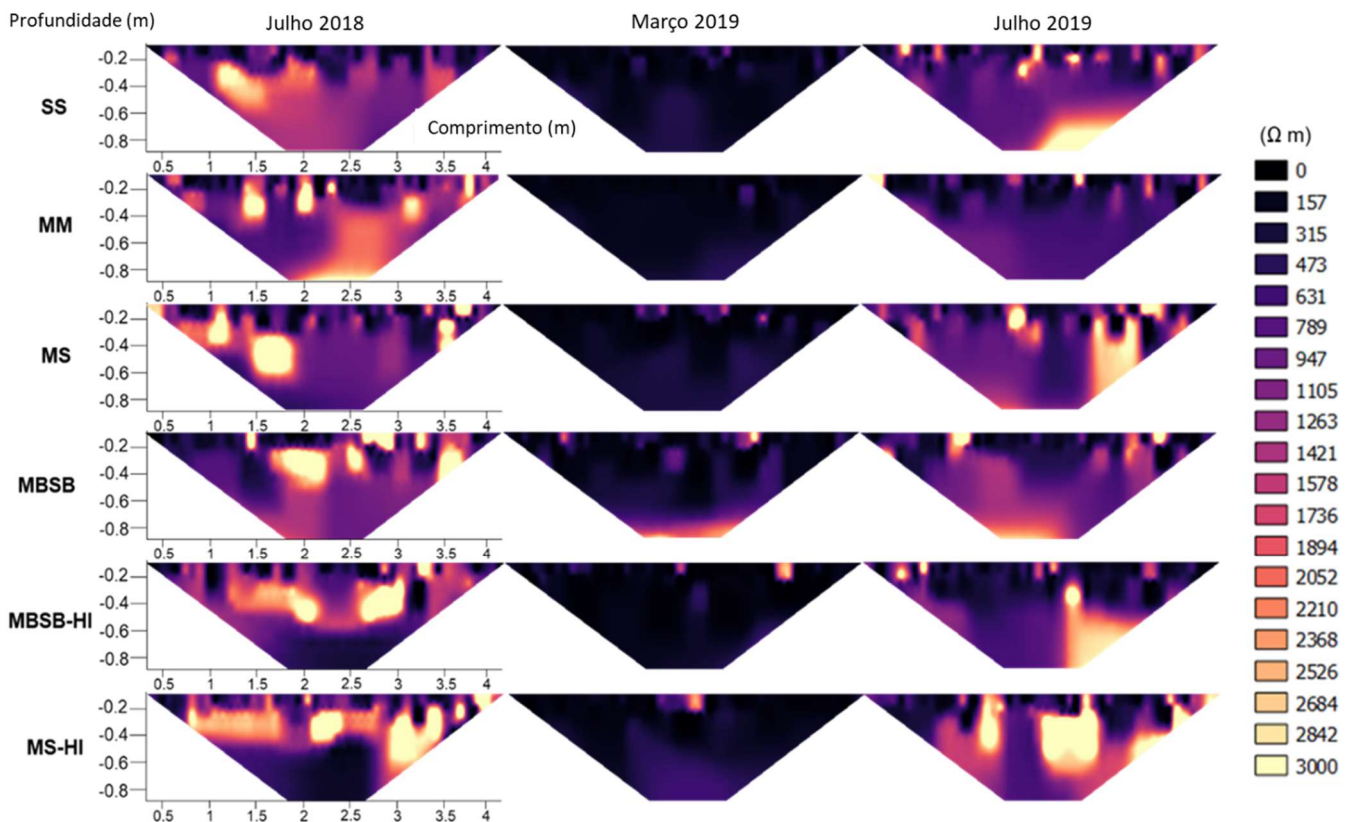
Sabendo-se que o Latossolo estudado por definição e por análises em campo e laboratório é homogêneo quanto a distribuição da textura nos horizontes, as zonas de alta ρ presentes no mapa, além da estrutura podem também ser explicadas pela distribuição do sistema radicular. Essas zonas de alta ρ de acordo com vários trabalhos podem corresponder a zonas de alta densidade radicular e/ou maior porosidade (Amato et al., 2008; Consoli et al., 2017; Satriani et al., 2015). Como a arquitetura das raízes de cada planta é diferente no perfil do solo e portanto influi na comparação entre imagens de diferentes culturas (Srayeddin and Doussan, 2009), isso causa alta heterogeneidade na ρ tornando difícil a análise distinguindo efeito entre estrutura e raízes em áreas agrícolas (Besson et al., 2004).

Com a adoção de rotação de culturas, a estrutura do solo pode ficar mais heterogênea devido à distribuição e desenvolvimento diferente das raízes de cada planta. As imagens de

ERT da Figura 4 apresentam este padrão, pelas quais observa-se que nos tratamentos de monocultivos (SS e MM) as imagens do perfil do solo são mais homogêneas quando comparadas aos outros tratamentos, os quais envolvem rotação de culturas, portanto, apresentando maior heterogeneidade. Nesse sentido sugere-se que os sistemas intensificados, pela adoção de rotação de culturas, mostraram maior presença de zonas de alta ρ ($>2500 \Omega m$) devido ao aumento na presença de raízes e/ou porosidade, que pode ser associada a uma melhoria da qualidade do solo.

Pela Figura 4 é possível observar que os padrões de alta ρ são sazonais, isto é, na época chuvosa (março de 2019) não podem ser observados. Vanella et al. (2018) mostra que isso ocorre devido à forte secagem do solo que as raízes exercem no solo próximo a elas devido à absorção de água. Assim, diferindo da hipótese de que a maioria dos sinais elétricos das raízes se deve a suas grandes estruturas lignificadas, e essas se comportariam com uma matriz resistiva contínua e ramificada que interage com o solo, matriz composta por complexas camadas condutoras (Amato et al., 2008; Consoli et al., 2017) ou seja, de baixa resistividade. Portanto, os resultados estão em acordo com a hipótese apresentada por Vanella et al. (2018).

Figura 4. Tomografia de resistividade elétrica para cada manejo do solo durante o período de avaliação em um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas - MG.



Legenda: SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária e HI = alto investimento em fertilizantes.

3.2 Resultados de calibração para a estimativa do θ em um Latossolo Vermelho distrófico típico

A comparação entre os modelos utilizados para calibração da resistividade elétrica em função do conteúdo de água no solo (θ) está expressa na Tabela 4. De forma geral, o modelo potencial apresentou maior exatidão em todos os tratamentos, mostrando menores valores de RMSE, MAE e AIC. Exceção ocorreu para o tratamento MBSB, o qual apresentou valores ligeiramente maiores de RMSE e AIC em comparação com o modelo logarítmico.

Tabela 4. Exatidão e parâmetros dos modelos utilizados para calibração da resistividade elétrica do solo em função do conteúdo de água em um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas - MG.

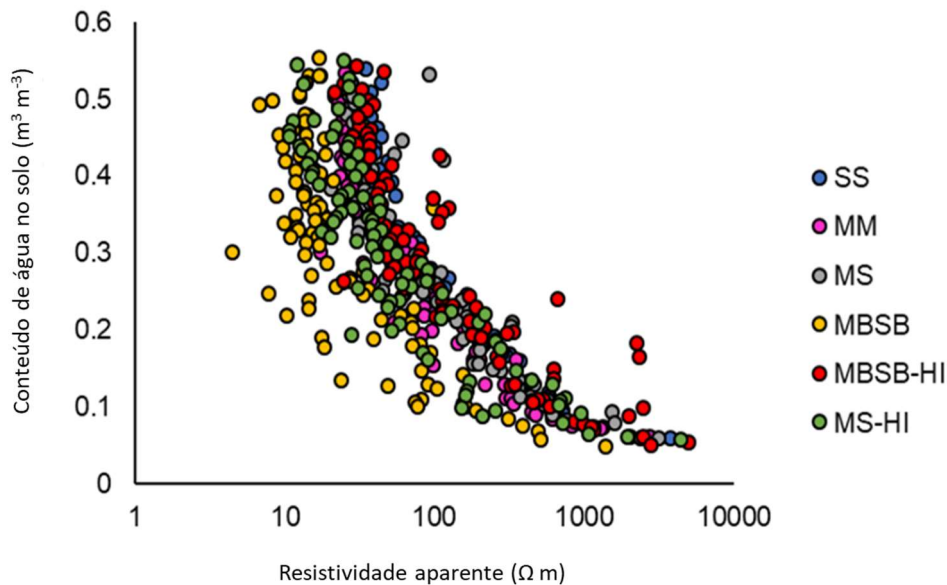
| Modelo | Manejo do solo | a | b | RMSE | MAE | R ² | AIC |
|-------------|----------------|---------|---------|--------|--------|----------------|---------|
| Potencial | SS | 3,1586 | -0,5322 | 0,0316 | 0,0226 | 0,942 | -185,47 |
| | MM | 1,8875 | -0,4606 | 0,0395 | 0,0270 | 0,901 | -334,66 |
| | MS | 1,7900 | -0,4259 | 0,0529 | 0,0347 | 0,827 | -288,86 |
| | MBSB | 0,9400 | -0,3606 | 0,0849 | 0,0635 | 0,580 | -194,99 |
| | MBSB-HI | 1,7599 | -0,4024 | 0,0563 | 0,0419 | 0,822 | -265,21 |
| | MS-HI | 1,2373 | -0,372 | 0,0599 | 0,0467 | 0,791 | -250,77 |
| Logarítmico | | a | b | RMSE | MAE | R ² | AIC |
| | SS | 0,80017 | -0,2469 | 0,0514 | 0,0397 | 0,846 | -139,56 |
| | MM | 0,72222 | -0,2313 | 0,0506 | 0,0383 | 0,838 | -288,13 |
| | MS | 0,72359 | -0,2212 | 0,0585 | 0,0448 | 0,789 | -269,29 |
| | MBSB | 0,61334 | -0,2164 | 0,0835 | 0,0647 | 0,594 | -198,19 |
| | MBSB-HI | 0,70493 | -0,1991 | 0,0650 | 0,0549 | 0,763 | -238,61 |
| | MS-HI | 0,65630 | -0,2022 | 0,0650 | 0,0483 | 0,754 | -235,78 |

RMSE = raiz do erro quadrático médio, MAE = erro médio absoluto, AIC = critério de informação de Akaike. SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária e HI = alto investimento em fertilizantes.

O bom ajuste do modelo potencial para representar a relação resistividade-conteúdo de água (Figura 5) concorda com resultados obtidos por Calamita et al. (2012) e Ma et al. (2014) tendo em vista que o modelo potencial tem a mesma forma da solução analítica da relação semi-empírica θ - ρ conhecida como “Lei de Archie” (Archie, 1942). Entretanto, esse resultado difere do esperado uma vez que esse modelo não seria adequado para solos argilosos segundo Calamita et al. (2012). Como o Latossolo possui estrutura granular, na qual os grãos de argila se aglutinam e comportam-se/funcionam como areia em função do tamanho do agregado estável - formado pelos agentes cimentantes presentes - conhecidos como pseudo-areia (Ferreira et al., 1999; Resende et al., 2007; Silva et al., 2019). Partículas de areia apresentam menor condutividade elétrica em relação as partículas finas devido à menor superfície específica (Samouëlian et al., 2005) e assim maior resistividade elétrica para um mesmo θ , o que pode explicar o formato do modelo potencial nesse solo. Desta forma, para prosseguimento do trabalho, a calibração dos dados mensurados em campo foi realizada utilizando o modelo potencial e os respectivos parâmetros da equação empírica de ajuste (Tabela 4).

Na Fig. 5 destaca-se os altos valores de resistividade aparente em relação à resultados encontrados na literatura, com valores acima de 5000 Ω m em condição de solo seco para os dados observados em laboratório e próximos a 3000 Ω m para os dados obtidos em campo. Estes valores diferem consideravelmente dos valores encontrados na literatura, em geral próximos de 100 Ω m (Besson et al., 2004; Ma et al., 2014; Srayeddin and Doussan, 2009), e raramente acima de 1000 Ω m (Calamita et al., 2012), mesmo em condições de solo seco (Ainlhout et al., 2016). Esses altos valores podem ser atribuídos às particularidades do solo estudado, um Latossolo muito intemperizado da região do Cerrado brasileiro, principalmente no que se refere à sua mineralogia oxídica, o que leva a formação de uma estrutura granular fortemente desenvolvida (Ferreira et al., 1999; Ker, 1997). A estrutura granular confere a esses solos uma alta porosidade (Ajayi et al., 2009; Ferreira et al., 1999; Goedert, 1983; B. M. Silva et al., 2015), sobretudo a macroporosidade, possivelmente a causa dos altos valores de resistividade encontrados para este solo tropical. O solo da área experimental apresenta valores acima de 0,60 m^3m^{-3} de porosidade e densidade em torno de 1.0 g cm^{-3} em condições naturais (Galvão and Schulze, 1996), sendo cerca de metade da porosidade composta por macroporos.

Figura 5. Relação entre resistividade elétrica e conteúdo de água no solo destacando a relação potencial usando dados observados em laboratório para um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas – MG.



Legenda: SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária e HI = alto investimento em fertilizantes.

3.3 Dinâmica espaço-temporal do θ em função do sistema de manejo

As imagens do θ em cada período de avaliação bem como a variação percentual com o tempo estão apresentadas, respectivamente, nas Figuras 6 e 7. Observa-se a condição de solo seco nos meses de julho, característicos do inverno seco na região de estudo, o que impede cultivos de inverno e também cultivos de 2ª safra, estes praticados em outras regiões do Brasil. Na Fig. 6 observa-se predomínio de $\theta < 0,24 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no mês de julho, menor que $\theta = 0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o menor valor dentre os tratamentos estimado para ponto de murcha permanente (Tabela 2) e assim sugerindo a indisponibilidade de água para as plantas durante o período de inverno. Entretanto, nos tratamentos em que há rotação com braquiária, a gramínea permanece na área até que seja dessecada para a semeadura da próxima safra, entre outubro e novembro de cada ano. Desta forma, infere-se que a manutenção da braquiária no campo durante o inverno só é possível devido ao profundo e vigoroso sistema radicular desta gramínea (Carducci et al., 2013; Crusciol et al., 2014), conseguindo acessar profundidades onde tenha água disponível para absorção, maiores do que as disponíveis nas imagens do monitoramento. Nesse sentido Silva et al. (2019) mostraram que a braquiária absorveu água substancialmente até 0,6 m de profundidade (limite máximo avaliado) em Latossolo semelhante ao do presente estudo,

sinalizando potencial para absorção em maior profundidade. Assim, o maior secamento do solo na camada 0,6-0,8 m em março de 2019 pode ser relacionado a absorção de água em profundidade pela braquiária em MBSB.

Outro aspecto importante a respeito do θ em períodos secos se refere à quantificação do ponto de murcha permanente. O valor médio entre os tratamentos de $\theta = 0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ presente na Tabela 2 foi estimado com o Câmara de Richards, θ que é observado em grande parte dos perfis do solo na época úmida, e abaixo desse valor nas épocas secas. O trabalho de Silva et al. (2014) discute a respeito dos métodos de determinação concluindo que o método interfere significativamente nos resultados e portanto na discussão e avaliação da água disponível para as plantas. Como exemplo, no Latossolo estudado pelos autores o θ no PWP é de $0,22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ quando estimado pela determinação em Câmara de Richards e $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o psicrômetro de termopar.

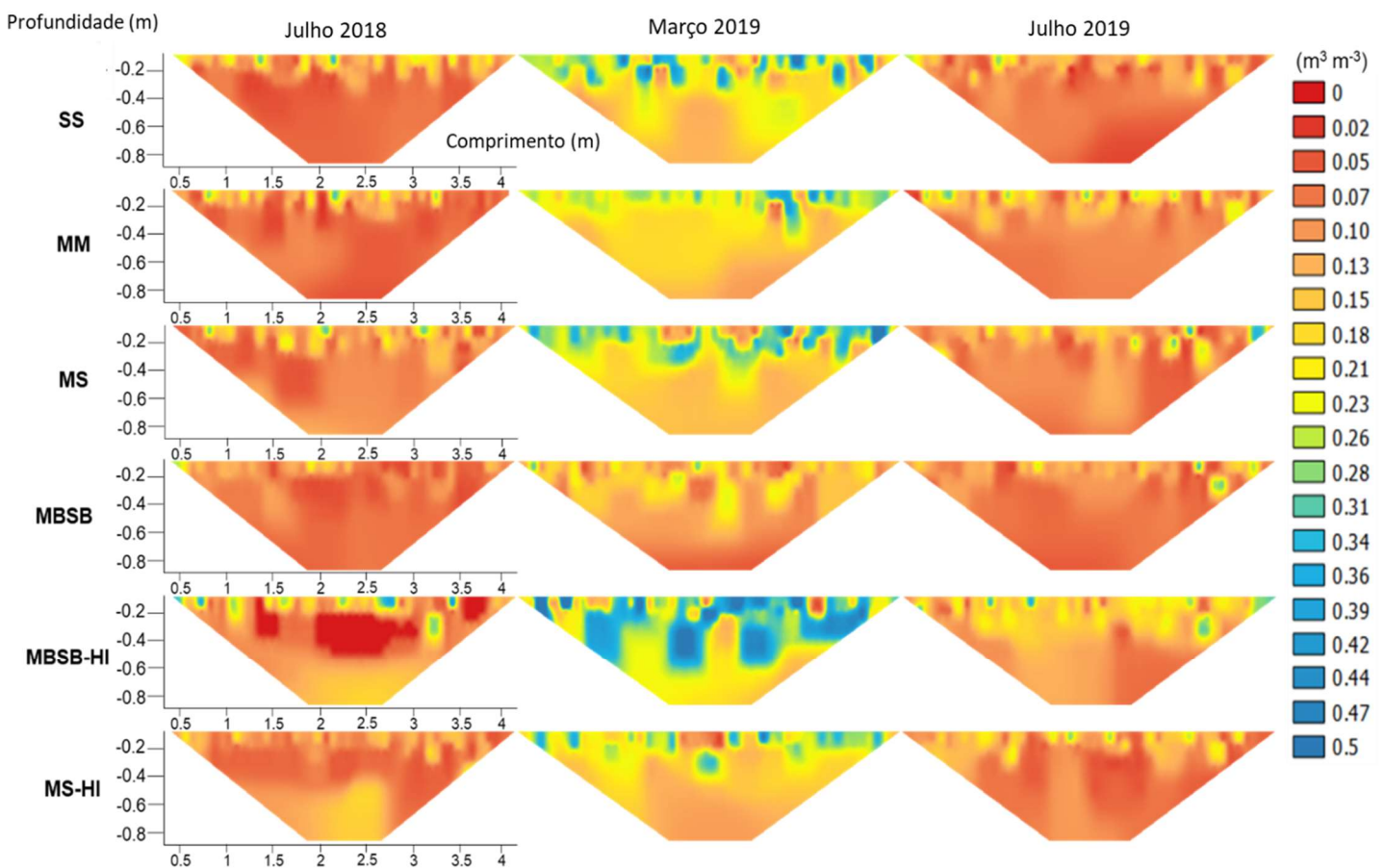
Nas Fig. 6 e 7 é possível destacar alterações no padrão espaço-temporal do θ devido aos tratamentos que envolvem a rotação soja-milho e sucessão com braquiária. O manejo MBSB apresentou o perfil de solo mais seco na avaliação de março de 2019. Tal fato é explicado por esse tratamento ser o único com cobertura viva em campo (braquiária) durante os dias de análise. Nos demais tratamentos a colheita já fora realizada e, portanto, estes apresentavam apenas cobertura morta na superfície do solo. O tratamento MBSB-HI, o qual também envolve a sucessão com braquiária, a gramínea ainda não havia sido semeada, diferenciando dos outros anos nos quais a braquiária no MBSB-HI fora semeada no estágio de enchimento de grãos das culturas, neste ano de 2019 a semeadura da gramínea atrasou por questões operacionais e foi realizada após a colheita da soja. Portanto, o solo mais seco em MBSB é atribuído à absorção de água pela braquiária, a qual estava em pleno desenvolvimento vegetativo após a colheita do milho, o que permitiu um desenvolvimento rápido pela maior incidência de luz solar e menor competição por água e nutrientes (Crusciol et al., 2014).

Nota-se o contraste entre o padrão de θ temporalmente entre julho de 2018 e julho de 2019 para MBSB-HI destacando-o dos demais tratamentos, que pode ser explicado pela maior absorção de água pelas plantas em 2018 com presença de braquiária, até 0,6 m de profundidade tal como observado por Silva et al., (2019) também com braquiária em solo semelhante na mesma profundidade. E, na ausência de braquiária em 2019 (como relatado anteriormente), observa-se, opostamente, maior θ para a mesma profundidade reforçando assim que a presença de raízes mais efetivas em absorver água concentra-se nessa zona. Ademais, na Fig. 7 observa-se a alta diferença de θ de julho de 2018 para março de 2019 neste tratamento, o que pode estar

relacionado a alta porosidade do solo aliado a bioporos possivelmente formados pela ação agressiva da raiz da braquiária (Calonego et al., 2017, 2011; Crusciol et al., 2014, 2012; Nascente et al., 2013) propiciando grande amplitude de variação de θ nesse período de tempo.

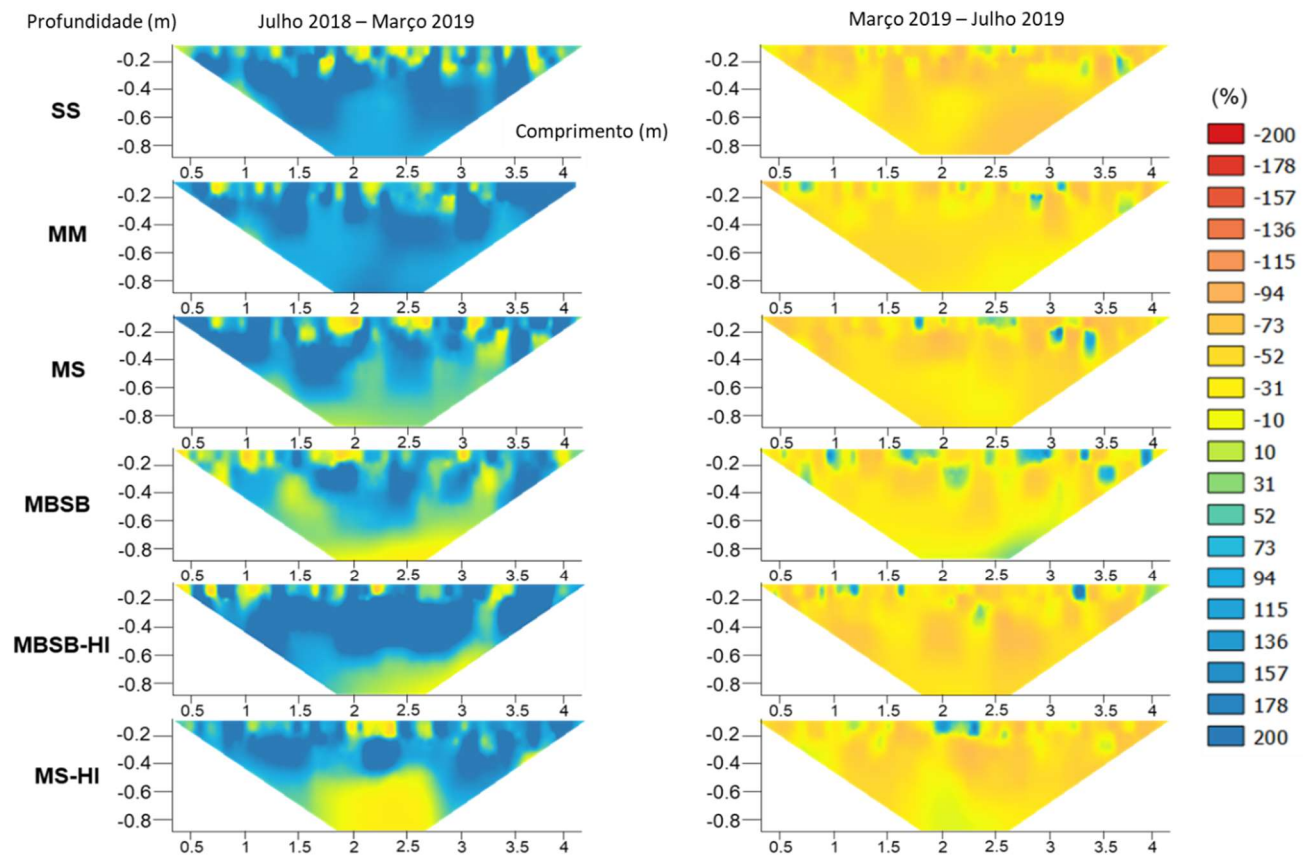
Os maiores θ de modo geral observados em março de 2019 ocorreram para manejo MBSB-HI comparado aos demais tratamentos. Este fato é atribuído, principalmente, à combinação de ausência da braquiária viva (como relatado anteriormente) e à alta taxa de cobertura vegetal do solo - deixada pela palhada de braquiária e milho do ano anterior - quando comparada aos outros tratamentos (ver Tabela 3), o que diminui as taxas de evaporação bem como intercepta as gotas de chuva diminuindo as eventuais perdas de água por escoamento superficial favorecendo o aumento do armazenamento de água no solo (Blanco-Canqui and Ruis, 2018; Dechen et al., 2015; Merten et al., 2015).

Figura 6. Conteúdo de água no solo estimado por medições de resistividade elétrica para cada manejo do solo em um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG.



Legenda: SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária e HI = alto investimento em fertilizantes.

Figura 7. Porcentagem de variação do conteúdo de água no solo estimado por medições de resistividade elétrica para cada manejo do solo em um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG.



Legenda: SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária e HI = alto investimento em fertilizantes.

3.4 Atividade radicular e produtividade das culturas

A avaliação indireta da atividade radicular pelo método de aplicação de rubídio está expressa na Tabela 5. De forma geral, a concentração de $0,35 \text{ mol L}^{-1}$ não foi suficiente para possibilitar a detecção de diferenças de acumulação de Rb em tratamentos e em profundidades, como observado por Pivetta et al. (2011) e Rosolem e Pivetta (2017), os quais utilizaram $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ de concentração de RbNO_3 nas aplicações. Entretanto, observou-se a maior acumulação de Rb no tratamento MM em detrimento da REF (planta sem aplicação), o que permite inferir que a planta de milho absorveu o Rb aplicado. Todavia, não foram observadas evidências suficientes para distinção dos tratamentos quanto à atividade radicular, desta forma, os resultados obtidos sugerem que novas pesquisas devem priorizar maiores concentrações da solução de RbNO_3 do que a utilizada no presente trabalho.

Tabela 5. Teores de rubídio nas plantas e o erro padrão da média considerando a avaliação indireta da atividade radicular pela aplicação de RbNO_3 . Em MBSB não houve repetições.

| Manejo do solo | Cultura | Profundidade (m) | | |
|----------------|---------|----------------------------|--------------|--------------|
| | | 0,05 | 0,15 | 0,40 |
| | | Rb (mg kg^{-1}) | | |
| SS | Soja | 40,58 ± 14,31 | 33,20 ± 2,16 | 34,41 ± 6,48 |
| MM | Milho | 35,76 ± 4,48 | 34,02 ± 2,26 | 29,57 ± 2,50 |
| MS | Milho | 24,03 ± 1,65 | 31,28 ± 2,55 | 21,10 ± 3,12 |
| MBSB | Milho | 20,69 | 26,85 | 22,43 |
| MBSB-HI | Soja | 39,35 ± 9,72 | 35,44 ± 2,30 | 32,58 ± 4,72 |
| MS-HI | Soja | 43,49 ± 10,82 | 38,11 ± 8,75 | 37,27 ± 3,57 |
| REF | Soja | 31,80 ± 5,16 | - | - |
| REF | Milho | 24,96 ± 2,19 | - | - |

SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária, HI = alto investimento em fertilizantes, REF = planta referência sem aplicação.

A produtividade da cultura da soja (Tabela 3) foi extremamente baixa comparada à média de produtividade do ano registrada para o estado de Minas Gerais ($\sim 3000 \text{ kg ha}^{-1}$) (Conab, 2019). Esse resultado é explicado pelo período de estiagem de mais de 30 dias observado na região, do início de janeiro a fevereiro (Figura 2), em plena fase de formação e enchimento dos grãos da cultura. Ademais, além do déficit de suprimento hídrico da própria cultura, o período de seca explica a ausência de efeito do maior nível de investimento em fertilizantes, possivelmente reduzindo a eficiência dos mecanismos de transporte de nutrientes e absorção pelas raízes das plantas.

Com base nos resultados de produtividade, a cultura da soja apresentou-se mais vulnerável que o milho ao período de seca registrado na região. Independente do sistema de manejo adotado, tratamentos nos quais foi semeada a cultura do milho no ano de 2018 apresentaram produtividades semelhantes ou acima da média do ano registrada para o estado de Minas Gerais ($\sim 6000 \text{ kg ha}^{-1}$) (Conab, 2019). A maior suscetibilidade ao déficit hídrico da cultura da soja em relação a cultura do milho é atribuída ao menor aprofundamento radicular (Gao et al., 2010), resultado em menor capacidade de uso da água no perfil do solo. Desta forma, o principal fator limitante à produtividade da cultura da soja foi o aspecto climático, devido aos mais de 30 dias de estiagem com altas temperaturas (Figura 2) entre os meses de janeiro e fevereiro.

A intensificação do sistema no tratamento MBSB, o qual em 2018 esteve sob cultivo de milho, mostrou-se benéfica, aumentando a produtividade da cultura e permitem a inferência

que o a rotação com braquiária melhorou as condições de cultivo, evidenciando a maior influência dos benefícios da diversificação do sistema em detrimento da possível competição do milho e da braquiária por água, visto que o solo se apresentava em condições mais secas próximo à época da colheita (Fig. 6). Esses resultados contribuem com outros benefícios do consórcio milho-braquiária já reportados na literatura (Borghetti et al., 2012; Garcia et al., 2008).

4. Conclusões

A técnica de tomografia de resistividade elétrica provou ser adequada para monitoramento da variação temporal do conteúdo de água no solo bem como para inferir a respeito da absorção de água pelas plantas em um Latossolo tropical muito intemperizado. Os altos valores de ρ comparados à trabalhos com solos de clima temperado, encontrados em pontos das imagens nos períodos de solo seco, reforçam a alta porosidade inerente aos Latossolos tropicais de estrutura granular. O modelo potencial mostrou-se adequado para representar a relação θ - ρ em um Latossolo muito argiloso de estrutura granular, diferindo de trabalhos passados que indicavam a inadequabilidade deste modelo para solos argilosos. Essa distinção reforça a particularidade do solo estudado no presente trabalho. MBSB-HI apresentou a maior umidade do solo no mês de março de 2019 devido à maior cobertura morta do solo, evitando taxas elevadas de evaporação. A atividade de absorção de água pelas plantas foi evidenciada por MBSB no mês de março de 2019. As tomografias indicam a indisponibilidade de água para as plantas durante o período de inverno para a região estudada, e a manutenção da braquiária no período da entressafra é possível devido ao profundo sistema radicular da gramínea. Entretanto, a metodologia aplicada para avaliação de atividade radicular não demonstrou evidências suficientes para distinguir os sistemas de manejo quanto a atividade de raízes em profundidade, possivelmente pela baixa concentração da dose utilizada.

Agradecimentos

Os autores agradecem a contribuição financeira da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) processos CAG - APQ-02075-16 e PPM-00774-18, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) processos 422538/2016-7 e 408204/2016-8, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras (DCS – UFLA). Os autores agradecem a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

(Embrapa) pela colaboração na instalação e condução do experimento de campo. BMS agradece o CNPq pelo apoio financeiro.

Referências

- Ain-lhout, F., Boutaleb, S., Diaz-barradas, M.C., Jauregui, J., Zunzunegui, M., 2016. Monitoring the evolution of soil moisture in root zone system of *Argania spinosa* using electrical resistivity imaging. *Agricultural Water Management* 164, 158–166. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.08.007>
- Ajayi, A.E., Dias Junior, M.S., Curi, N., Gontijo, I., Araujo-Junior, C.F., Vasconcelos Junior, A.I., 2009. Relation of strength and mineralogical attributes in Brazilian latosols. *Soil and Tillage Research* 102, 14–18. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.05.013>
- Amato, M., Basso, B., Celano, G., Bitella, G., Morelli, G., Rossi, R., 2008. In situ detection of tree root distribution and biomass by multi-electrode resistivity imaging. *Tree Physiology* 28, 1441–1448. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.10.1441>
- Archie, G.E., 1942. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. *Trans. AIME* 146 1, 54–62.
- Asmamaw, D.K., 2017. A critical review of the water balance and agronomic effects of conservation tillage under rain-fed agriculture in Ethiopia. *Land Degradation and Development* 855, 843–855. <https://doi.org/10.1002/ldr.2587>
- Beff, L., Günther, T., Vandoorne, B., Couvreur, V., Javaux, M., 2013. Three-dimensional monitoring of soil water content in a maize field using Electrical Resistivity Tomography. *Hydrology and Earth System Sciences* 17, 595–609. <https://doi.org/10.5194/hess-17-595-2013>
- Besson, A., Cousin, I., Samouëlian, A., Boizard, H., Richard, G., 2004. Structural heterogeneity of the soil tilled layer as characterized by 2D electrical resistivity surveying. *Soil and Tillage Research* 79, 239–249. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.07.012>
- Binley, A., Hubbard, S.S., Huisman, J.A., Revil, A., Robinson, D.A., Singha, K., Slater, L.D., 2015. The emergence of hydrogeophysics for improved understanding of subsurface processes over multiple scales. *Water Resources Research* 3837–3866.

<https://doi.org/10.1002/2015WR017016>.Received

- Blanco-Canqui, H., Ruis, S.J., 2018. No-tillage and soil physical environment. *Geoderma* 326, 164–200. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011>
- Borghi, É., Crusciol, C.A.C., Nascente, A.S., Mateus, G.P., Martins, P.O., Costa, C., 2012. Effects of row spacing and intercrop on maize grain yield and forage production of palisade grass. *Crop and Pasture Science* 63, 1106–1113. <https://doi.org/10.1071/CP12344>
- Brito Galvão, T.C., Schulze, D.G., 1996. Mineralogical Properties of a Collapsible Lateritic Soil from Minas Gerais, Brazil. *Soil Science Society of America Journal* 60, 1969–1978.
- Brunet, P., Clément, R., Bouvier, C., 2010. Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT) – A case study in the Cevennes area, France. *Journal of Hydrology* 380, 146–153. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.10.032>
- Calamita, G., Brocca, L., Perrone, A., Piscitelli, S., Lapenna, V., Melone, F., Moramarco, T., 2012. Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites. *Journal of Hydrology* 454–455, 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.001>
- Calonego, J C Borghi, E Crusciol, C.A.C., 2011. Intervalo Hídrico Ótimo e compactação do solo com cultivo consorciado de milho e braquiária. *R. Bras. Ci. Solo* 35, 2183–2190.
- Calonego, J.C., Raphael, J.P.A., Rigon, J.P.G., Oliveira Neto, L. de, Rosolem, C.A., 2017. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. *European Journal of Agronomy* 85, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.02.001>
- Carducci, C.E., Oliveira, G.C. De, Zeviani, W.M., Lima, V.M.P., Serafim, M.E., 2013. BIMODAL PORE DISTRIBUTION ON SOILS UNDER CONSERVATION MANAGEMENT SYSTEM FOR COFFEE CROP. *Engenharia Agrícola* 33, 291–302. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162013000200008>.
- Cherubin, M.R., Karlen, D.L., Franco, A.L.C., Tormena, C.A., Cerri, C.E.P., Davies, C.A., Cerri, C.C., 2016. Geoderma Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil ☆. *Geoderma* 267, 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.004>
- Conab, 2019. Acompanhamento da safra brasileira de grãos 2018/19.

- Consoli, S., Stagno, F., Vanella, D., Boaga, J., Cassiani, G., Rocuzzo, G., 2017. Partial root-zone drying irrigation in orange orchards: Effects on water use and crop production characteristics. *European Journal of Agronomy* 82, 190–202.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.11.001>
- Crusciol, C.A.C., Mateus, G.P., Nascente, A.S., Martins, P.O., Borghi, E., Pariz, C.M., 2012. An innovative crop-forage intercrop system: Early cycle soybean cultivars and palisadegrass. *Agronomy Journal* 104, 1085–1095.
<https://doi.org/10.2134/agronj2012.0002>
- Crusciol, C.A.C., Nascente, A.S., Mateus, G.P., Pariz, C.M., Martins, P.O., Borghi, E., 2014. Intercropping soybean and palisade grass for enhanced land use efficiency and revenue in a no till system. *European Journal of Agronomy* 58, 53–62.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.05.001>
- De Brito Galvão, T.C., Schulze, D.G., 1996. Mineralogical properties of a collapsible lateritic soil from Minas Gerais, Brazil. *Soil Science Society of America Journal* 60, 1969–1978.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000060050x>
- Dechen, S.C.F., Telles, T.S., Guimarães, M.F., De Maria, I, C., 2015. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. *Bragantia* 74, 224–233. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0363>
- Dexter, A.R., 2004. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120, 201–214.
<https://doi.org/10.1016/j.geodermaa.2003.09.005>
- Dick, J., Tetzlaff, D., Bradford, J., Soulsby, C., 2018. Using repeat electrical resistivity surveys to assess heterogeneity in soil moisture dynamics under contrasting vegetation types. *Journal of Hydrology* 559, 684–697. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.062>
- Ferreira, M.M., Fernandes, B., Curi, N., 1999. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 23, 515–524.
- Gao, Y., Duan, A., Qiu, X., Liu, Z., Sun, J., Zhang, J., Wang, H., 2010. Distribution of roots and root length density in a maize/soybean strip intercropping system. *Agricultural Water Management* 98, 199–212. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.08.021>

- García-Tomillo, A., Figueiredo, T. De, Dafonte, J.D., Almeida, A., Paz-González, A., 2018. Effects of machinery trafficking in an agricultural soil assessed by Electrical Resistivity Tomography (ERT). *Open Agriculture* 3, 378–385. <https://doi.org/10.1515/opag-2018-0042>
- Garcia, R.A., Crusciol, C.A.C., Calonego, J.C., Rosolem, C.A., 2008. Potassium cycling in a corn-brachiaria cropping system. *European Journal of Agronomy* 28, 579–585. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.01.002>
- Goedert, W.J., 1983. Management of the Cerrado soils of Brazil : a review. *Journal of Soil Science* 34, 405–428.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, 2019. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Acessado em 23/12/2019.
- Jeřábek, J., Zúmr, D., Dostál, T., 2017. Identifying the plough pan position on cultivated soils by measurements of electrical resistivity and penetration resistance. *Soil and Tillage Research* 174, 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.008>
- Ker, J.C., 1997. Latossolos do Brasil: Uma revisão. *Geonomos* 5, 17–40.
- Ma, Y., Dam, R.L. Van, Jayawickreme, D.H., 2014. Soil moisture variability in a temperate deciduous forest: insights from electrical resistivity and throughfall data. *Environ Earth Sci* 72, 1367–1381. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3362-y>
- Mancosu, N., Snyder, R.L., Kyriakakis, G., Spano, D., 2015. Water Scarcity and Future Challenges for Food Production. *Water* 7, 975–992. <https://doi.org/10.3390/w7030975>
- Merten, G.H., Araújo, A.G., Biscaia, R.C.M., Barbosa, G.M.C., Conte, O., 2015. No-till surface runoff and soil losses in southern Brazil. *Soil and Tillage Research* 152, 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.03.014>
- Michot, D., Benderitter, Y., Dorigny, A., Nicoulaud, B., King, D., Tabbagh, A., 2003. Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography. *Water Resources Research* 39, 1–20. <https://doi.org/10.1029/2002WR001581>
- Nascente, A.S., Crusciol, C.A.C., Cobucci, T., 2013. The no-tillage system and cover crops — Alternatives to increase upland rice yields. *European Journal of Agronomy* 45, 124–131. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.09.004>

- Olibone, A.P.E., Olibone, D., Rosolem, C.A., 2008. Atividade radicular da soja: definição de um método. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 899–903.
- Peixoto, D.S., Silva, B.M., de Oliveira, G.C., Moreira, S.G., da Silva, F., Curi, N., 2019. A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. *Soil and Tillage Research* 194, 104307. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104307>
- Pivetta, L.A., Castoldi, G., Santos, G.P., Rosolem, C.A., 2011. Crescimento e atividade de raízes de soja em função do sistema de produção. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 1547–1554.
- Ranjy Roodposhti, H., Hafizi, M.K., Soleymani Kermani, M.R., Ghorbani Nik, M.R., 2019. Electrical resistivity method for water content and compaction evaluation, a laboratory test on construction material. *Journal of Applied Geophysics* 168, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.05.015>
- Reichert, J.M., da Rosa, V.T., Vogelmann, E.S., da Rosa, D.P., Horn, R., Reinert, D.J., Sattler, A., Denardin, J.E., 2016. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. *Soil and Tillage Research* 158, 123–136. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.11.010>
- Resende, M., Curi, N., Rezende, S.B., Corrêa, G.F., 2007. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. Lavras: Editora UFLA 5. ed. rev, 322 p.
- Resende, A. V., Silva, A.F., Borghi, E., Gontijo Neto, M.M., Shiratsuchi, L.S., Pitta, R.M., Ferreira, A., 2016. Tomada de decisão quanto a adubação e manejo de nutrientes por agricultores do Mato Grosso: dados do Circuito Tecnológico 2015. Documentos/Embrapa Milho e Sorgo.
- Rosolem, C.A., Pivetta, L.A., 2017. Mechanical and biological approaches to alleviate soil compaction in tropical soils : assessed by root growth and activity (Rb uptake) of soybean and maize grown in rotation with cover crops. *Soil Use and Management* 141–152. <https://doi.org/10.1111/sum.12313>
- Safadoust, A., Feizee, P., Mahboubi, A.A., Gharabaghi, B., Mosaddeghi, M.R., Ahrens, B., 2014. Least limiting water range as affected by soil texture and cropping system. *Agricultural Water Management* 136, 34–41.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.01.007>

- Samouelian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., Richard, G., 2005. Electrical resistivity survey in soil science : a review. *Soil and Tillage Research* 83, 173–193.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004>
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., Richard, G., 2005. Electrical resistivity survey in soil science: A review. *Soil and Tillage Research* 83, 173–193.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004>
- Santos, H.G., Jacomine, P.K.T., Anjos, L.H.C., Oliveira, V.A., Oliveira, J.B., Coelho, M.R., Lumberras, J.F., Cunha, T.J.F., 2013. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos 3^a edição revista e ampliada. [https://doi.org/ISBN 978-85-7035-198-2](https://doi.org/ISBN%20978-85-7035-198-2)
- Satriani, A., Loperte, A., Soldovieri, F., 2015. Integrated geophysical techniques for sustainable management of water resource. A case study of local dry bean versus commercial common bean cultivars. *Agricultural Water Management* 162, 57–66.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.08.010>
- Serafim, M.E., Zeviani, W.M., Ono, F.B., Neves, L.G., Silva, B.M., Lal, R., 2019. Reference values and soil quality in areas of high soybean yield in Cerrado region, Brazil. *Soil and Tillage Research* 195. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104362>
- Silva, B.M., da Silva, E.A., de Oliveira, G.C., Ferreira, M.M., Serafim, M.E., 2014. Plant-Available Soil Water Capacity: Estimation Methods and Implications. *Revista Brasileira De Ciencia Do Solo* 38, 464–475. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200011>
- Silva, B.M., Oliveira, G.C., Serafim, M.E., da Silva, E.A., Ferreira, M.M., Norton, L.D., Curi, N., 2015. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. *Soil & Tillage Research* 154, 103–113.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.013>
- Silva, B.M., Oliveira, G.C., Serafim, M.E., Silva, É.A. Da, Guimarães, P.T.G., Melo, L.B.B. de, Norton, L.D., Curi, N., 2019. Soil moisture associated with least limiting water range , leaf water potential , initial growth and yield of coffee as affected by soil management system. *Soil & Tillage Research* 189, 36–43.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.016>
- Silva, B.M., Santos, W.J.R., Oliveira, G.C., Lima, J.M., Curi, N., Marques, J.J., 2015. Soil

moisture space-time analysis to support improved crop management. *Ciencia e Agrotecnologia* 39, 39–47.

Soil Survey Staff, 2014. Keys to soil taxonomy. Usda 12, 410.

<https://doi.org/10.1109/TIP.2005.854494>

Srayeddin, I., Doussan, C., 2009. Estimation of the spatial variability of root water uptake of maize and sorghum at the field scale by electrical resistivity tomography. *Plant and Soil* 319, 185–207. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9860-5>

Srayeddin, I., Doussan, C., 2009. Estimation of the spatial variability of root water uptake of maize and sorghum at the field scale by electrical resistivity tomography. *Plant and Soil* 319, 185–207. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9860-5>

Team, R.D.C., 2019. R: A language and environment for statistical computing. Viena, Austria.

Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A., Teixeira, W.G., 2017. Manual de Métodos de Análise de Solo, 3 ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa.

Vanella, D., Cassiani, G., Busato, L., Boaga, J., Barbagallo, S., Binley, A., Consoli, S., 2018. Use of small scale electrical resistivity tomography to identify soil-root interactions during deficit irrigation. *Journal of Hydrology* 556, 310–324. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.025>

Zhou, Q.Y., Shimada, J., Sato, A., 2001. Three-dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity tomography. *Water Resources Research* 37, 273–285.

Artigo II:

Varição temporal da estrutura do solo e desempenho agrônomo de milho e soja em sistemas de plantio direto na região central de Minas Gerais

Artigo formatado nas normas da Revista Soil & Tillage Research (versão preliminar)

Resumo

A adoção de sistemas conservacionistas torna-se fundamental para a manutenção da qualidade física do solo. O sistema plantio direto (NT) é amplamente adotado mundialmente e pode proporcionar benefícios aos sistemas de produção, dentre os quais destacam-se a conservação da umidade do solo, controle da erosão, incremento de matéria orgânica e melhorias na qualidade estrutural do solo. Entretanto, o desempenho do NT em proporcionar benefícios físicos ao solo é expressado progressivamente de acordo com o tempo de adoção. O estudo objetivou avaliar sistemas de produção de grãos em semeadura direta, investigando os efeitos de níveis de investimento em fertilizantes como forma de aumentar a produção de biomassa e consequente cobertura do solo bem como a rotação de culturas e consórcio com braquiária na variação temporal da estrutura do solo, por meio da resistência do solo à penetração de raízes (SPR), densidade do solo (Bd) e da modelagem do Intervalo Hídrico Ótimo (LLWR), no desempenho agrônômico das culturas do milho e soja, após 5 anos de adoção do NT. Observou-se a influência positiva de sistemas mais diversificados no aumento da produtividade do milho e no aumento do LLWR na camada superficial do solo. Esses resultados indicam o efeito positivo da inclusão da braquiária no sistema de plantio direto para produção de grãos. Os resultados de LLWR, Bd e SPR, em geral, indicam para um possível estágio de equilíbrio do NT após cinco anos de cultivo, entretanto, estudos de longo prazo devem ser realizados para confirmar a dinâmica do NT em Latossolos muito intemperizados de estrutura granular.

Palavras-chave: intervalo hídrico ótimo, rotação de culturas, qualidade física do solo

Abstract

The adoption of conservationist systems is essential for maintaining and improving soil physical quality. The no-tillage system (NT) is widely adopted worldwide and can provide benefits to agricultural production systems, among which the conservation of soil moisture, erosion control, increase of organic matter and improvements in soil structural quality. However, the NT performance in providing physical benefits to the soil is expressed progressively according to the time of adoption. The study aimed to evaluate grain production systems in no-till, investigating the effects of high and medium level of investment in fertilizers as a way to increase the production of biomass and consequent soil cover as well as crop rotation and intercropping with brachiaria in the temporal variation of soil structure, through the soil penetration resistance (SPR), bulk density (Bd) and the modeling of the Least Limiting Water Range (LLWR), in the agronomic performance of maize and soybean after 5 years of adoption of the NT. The positive influence of more diversified systems was observed in increasing maize yield and increase LLWR in the soil surface layer. These results indicate the positive effect of including brachiaria in the no-tillage system for grain production. The results of LLWR, Bd and SPR, in general, indicate a possible NT equilibrium stage after five years of cultivation, however, long-term studies must be carried out to confirm the dynamics of the NT in very weathered Oxisols with granular structure.

Keywords: least limiting water range, crop rotation, soil physical quality

1. Introduction

A qualidade física do solo é determinada por uma série de variáveis as quais exercem influência direta em propriedades químicas e biológicas do solo, portanto constituindo função central no agroecossistema (Dexter, 2004). A deterioração física do solo pode ser expressada por diversos indicadores os quais apresentam como causa comum a degradação da estrutura do solo (Dexter, 2004; Rabot et al., 2018; Reynolds et al., 2002). A estrutura do solo é diretamente associada à processos como a germinação de sementes, infiltração de água, aeração, desenvolvimento de raízes, agregação do solo, entre outros (Rabot et al., 2018; Reynolds et al., 2002). A qualidade estrutural do solo pode ser prejudicada pela atividade antrópica a depender do uso do solo e manejo adotado na área. O aumento da densidade do solo, da resistência à penetração de raízes e da taxa de escoamento superficial são evidências das consequências da intervenção humana em solos utilizados para a produção agropecuária (Letey, 1985; Rabot et al., 2018).

A adoção de sistemas conservacionistas torna-se fundamental para a manutenção da qualidade física do solo. O sistema plantio direto (NT) é amplamente adotado mundialmente em distintas condições geográficas e edafoclimáticas (Derpsch et al., 2010; Kassam et al., 2018) e pode proporcionar benefícios aos sistemas de produção, dentre os quais destacam-se a conservação da umidade do solo, controle da erosão, incremento de matéria orgânica e melhorias na qualidade estrutural do solo (Blevins et al., 1971; Crusciol et al., 2012; Derpsch et al., 2010; Betioli Júnior et al., 2012; Lal et al., 2007). Entretanto, o desempenho do NT em proporcionar benefícios físicos ao solo são expressados progressivamente de acordo com o tempo de adoção (Reichert et al., 2016) e no que se refere a promover aumento da produtividade das culturas, o sistema é extremamente dependente do contexto, sobretudo climático, no qual está inserido (Pittelkow et al., 2015).

A região central do estado de Minas Gerais apresenta regime de chuvas mal distribuído, com volume de precipitação concentrado entre os meses de outubro a abril, o que limita a atividade agrícola em condições de sequeiro fora deste intervalo. Ademais, a ocorrência de veranicos na safra de verão é recorrente, o que compromete a produtividade das lavouras devido ao déficit hídrico. A condição de escassez hídrica requer manejo rigoroso e impõe aos sistemas de produção atuais o desafio de atingir altas produtividades otimizando o uso de água pelas culturas (Srayeddin and Doussan, 2009). A baixa disponibilidade de água decorrente da sazonalidade de chuvas também pode ser acentuada caso haja degradação física do solo (Safadoust et al., 2014).

Considerando os fatores que influenciam o crescimento e desenvolvimento de plantas, a umidade do solo é o fator preponderante (Srayeddin and Doussan, 2009) por afetar diretamente outros atributos físicos (Letey, 1985). A adoção e o manejo adequado de sistemas conservacionistas é crucial para o incremento da infiltração e armazenamento de água no solo, evitando as perdas de água por escoamento superficial e evaporação, sobretudo em localidades que pratiquem a agricultura de sequeiro (Asmamaw, 2017; Dexter, 2004).

O suprimento adequado de água para as culturas é essencial, entretanto, o excesso de água no solo diminui a aeração do solo e limita o desenvolvimento de raízes por carência de oxigênio (Topp et al., 1997), bem como a falta, além do inerente suprimento deficitário às plantas, aumenta a resistência do solo à penetração de raízes, desta forma, torna-se necessário o estabelecimento de uma faixa de umidade não limitante ao crescimento vegetal (Letey, 1985). A partir do conceito introduzido por Letey (1985) como faixa de umidade não limitante foi proposta uma ferramenta para a avaliação da condição física do solo, a faixa de umidade menos limitante (Silva et al., 1994), tratado na literatura brasileira como Intervalo Hídrico Ótimo (LLWR). Este modelo apresenta robustez para inferência de alterações estruturais causadas pelo manejo do solo, uma vez que compreende fatores além da capacidade de água disponível do solo (PAWC), como resistência à penetração de raízes (SPR) e porosidade de aeração (AFP) que podem limitar o crescimento de raízes (Silva et al., 1994).

A abordagem do LLWR permite a avaliação da densidade do solo (Bd) e do conteúdo de água (θ) que proporcionam o irrestrito desenvolvimento das plantas. O LLWR possui como limite superior a umidade na capacidade de campo ou a umidade do solo relacionada à uma AFP limitante atribuída como mínima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Leão et al., 2006; Silva et al., 1994). Já o limite inferior é determinado pela umidade no ponto de murcha permanente ou pela umidade associada a SPR considerada crítica, comumente atribuída em valores de 2 e 3 MPa (Chen et al., 2014; Collares et al., 2006; Leão et al., 2006; Silva et al., 1994). A partir de dado valor de Bd pode-se inferir que o desenvolvimento vegetal está limitado por fatores além do conteúdo de água no solo. Caso haja a interseção das linhas representantes de AFP e SPR, têm-se então um valor de LLWR nulo, representando o valor de Bd considerado crítico ao crescimento de plantas, no qual independente do conteúdo de água no solo o desenvolvimento das plantas estará restrito por influência de AFP e/ou SPR (Silva et al., 1994).

O LLWR apresenta correlação positiva com o carbono orgânico do solo e promove maior sensibilidade para detecção de alterações estruturais pelo manejo do solo em comparação à PAWC (Leão et al., 2006; Safadoust et al., 2014; Tormena et al., 1998). A busca por maiores

produtividades e consequente intensificação dos sistemas produtivos pode alterar os atributos físicos do solo como Bd, PAWC, aeração e resistência mecânica à penetração de raízes, o que pode ser avaliado pela abordagem do LLWR. Entretanto, este indicador tem apresentado resultados contraditórios no que diz respeito à correlação com a produtividade das culturas, nem sempre estabelecendo uma relação positiva (Cecagno et al., 2016; Gubiani et al., 2013).

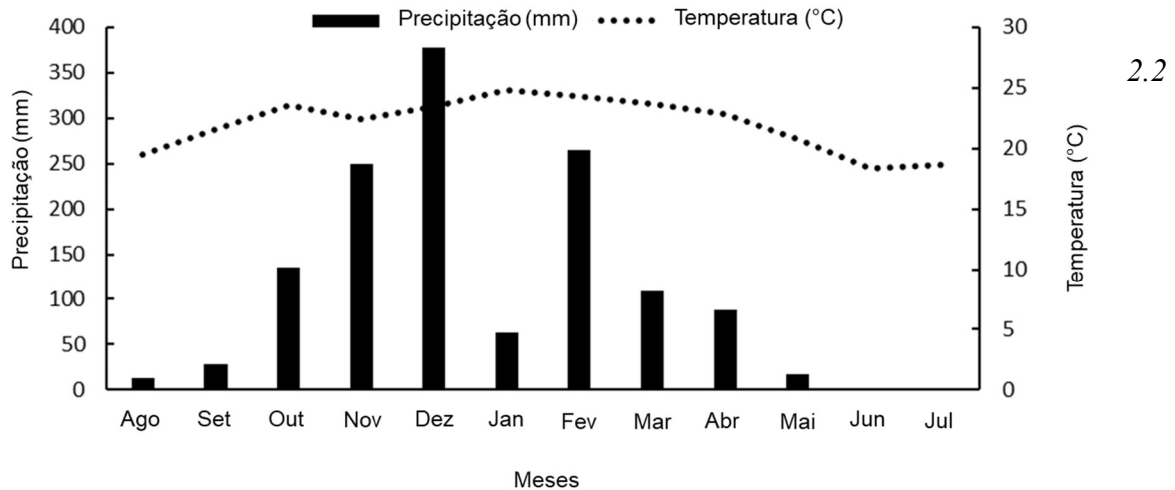
Diante do exposto, o estudo objetivou avaliar sistemas de produção de grãos em semeadura direta, investigando os efeitos de níveis de investimento em fertilizantes como forma de aumentar a produção de biomassa e consequente cobertura do solo bem como a rotação de culturas e consórcio com braquiária na variação temporal da estrutura do solo, por meio da resistência do solo à penetração de raízes, densidade do solo e da modelagem do LLWR, no desempenho agrônomo das culturas do milho e soja, após 5 anos de adoção do NT. A hipótese testada neste trabalho foi que a inclusão da braquiária no sistema promove maior cobertura do solo pela substancial produção de biomassa e resulta, devido ao sistema radicular agressivo, em melhorias na estrutura do solo, acarretando a otimização do uso da água pelas culturas ao longo do tempo (Borghì and Crusciol, 2007; Calonego et al., 2011; Chioderoli et al., 2012; Crusciol et al., 2014, 2012)

2. Material e Métodos

2.1 Área experimental

O experimento foi conduzido em fazenda experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) – Centro Nacional de Pesquisa em Milho e Sorgo, localizada no município de Sete Lagoas, Minas Gerais, coordenadas geográficas 19°28'30" S, 44°15'08" W. O clima predominante na região conforme classificação de Köppen é subtropical úmido (Cwa), apresentando temperatura média anual de 22,1 °C e pluviosidade média anual de 1.382,7 mm, com regime de chuvas irregular, concentradas no período de outubro a abril. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (Santos et al., 2013), correspondente a Typic Haplustox (Soil Survey Staff, 2014) de mineralogia composta majoritariamente por caulinita e gibbsita (Brito Galvão and Schulze, 1996) e textura muito argilosa, constituído por 190, 120 e 690 g kg⁻¹ de areia, silte e argila respectivamente.

Figura 1. Precipitação mensal acumulada e temperatura média para o período de agosto de 2018 a julho de 2019 no município de Sete Lagoas, Minas Gerais.



Sistemas de manejo do solo

O experimento foi instalado no mês de julho de 2014 em condições de sequeiro e com prévio preparo convencional do solo e está disposto em faixas paralelas de dimensões iguais totalizando uma área de 4,4 hectares e 1100 m de perímetro. Anteriormente à implantação do experimento a área foi utilizada para produção de milho e soja em sistema convencional de preparo do solo por mais de duas décadas. Foram realizadas operações de mobilização do solo com escarificador a 25 cm de profundidade, de modo a romper camadas compactadas. Realizou-se aplicações de calcário na dose de 4 t ha⁻¹ parceladas em duas operações, sendo a primeira incorporada com arado de aiveca e a segunda utilizando grade aradora. Também foi realizada aplicação de gesso agrícola na dose de 3 t ha⁻¹. Após dessecação da área foi adotado o sistema de plantio direto (NT).

Foram avaliados 6 tratamentos (Figura 1C, Tabela 1), os quais se diferem pelo manejo, todos em semeadura direta. Foram testados diferentes sistemas da rotação de culturas e investimento em fertilidade do solo como forma de melhorar a produção de palhada do sistema, melhoria da qualidade física do solo e aumento de produtividade de grãos. Na Tabela 1 estão descritos os tratamentos no decorrer dos anos desde a implantação do experimento. Monocultivos de soja (SS) e milho (MM) foram comparados às práticas de rotação de culturas (MS e MBSB). Adicionalmente, foram avaliados diferentes níveis de investimento em fertilidade do solo nos sistemas de rotação, sendo tratamentos de médio investimento contrastados com tratamentos de alto investimento (HI).

Tabela 1. Manejo do solo em cada ano agrícola em um Latossolo Vermelho distrófico típico no município de Sete Lagoas-MG. As safras 2016/2017 e 2017/2018 configuram os mesmos tratamentos que 2014/2015 e 2016/2017, respectivamente.

| Manejo do solo | Nível de investimento em fertilizantes | Safra | Safra | ... | Safra | Período entressafra |
|----------------|--|--------------------|--------------------|-----|--------------------|-------------------------------|
| | | 2014/2015 Verão | 2015/2016 Verão | | 2018/2019 Verão | 2015-2019 Outono-Primavera |
| SS | Médio | Soja | Soja | | Soja | Pousio |
| MM | Médio | Milho | Milho | | Milho | Pousio |
| MS | Médio | Milho | Soja | | Milho | Pousio |
| MBSB | Médio | Milho+braquiária | Soja+braquiária | | Milho+braquiária | Braquiária |
| MBSB-HI | Alto | Soja+braquiária | Milho+Braquiária | | Soja+braquiária | Braquiária |
| MS-HI | Alto | Soja | Milho | | Soja | Pousio |

SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária e HI = alto investimento em fertilizantes.

Para a safra 2018/2019, principal objeto de estudo deste trabalho, foram semeadas as cultivares RK 5813 RR para a soja e AG 8088 Pro2 para o milho, consistindo em 320.000 e 61.000 sementes por hectare, respectivamente. O milho foi semeado em espaçamento de 70 cm e a soja com espaçamento de 50 cm entre as linhas de cultivo. A adubação consistiu em suprir totalmente as demandas nutricionais das culturas, caracterizando o nível de médio de investimento, e para o alto investimento, além do suprimento total da demanda das plantas, adubação suplementar considerando a exportação na colheita. Os níveis de investimento em fertilizantes são fundamentados nas recomendações de Resende et al. (2016) para elevadas produtividades de grãos de milho e soja. Foram utilizados 148, 250, 250, 250, 415 e 415 kg ha⁻¹ de NPK 08-28-16 + 0,3% de boro e 2,1% de enxofre para os tratamentos SS, MM, MS, MBSB, MBSB-HI e MS-HI, respectivamente. Os resultados da análise química do solo antes do plantio dos tratamentos em 2018 estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização química e física de um Latossolo Vermelho distrófico típico no município de Sete Lagoas-MG para cada tratamento antes da semeadura da safra de 2018/2019 (continua).

| Manejo do solo | Profundidade (m) | | | | | |
|----------------------------------|------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| | 0 - 0,10 | | | | | |
| | SS | MM | MS | MBSB | MBSB-HI | MS-HI |
| pH (H ₂ O) | 5,94 | 5,61 | 5,72 | 5,62 | 6,02 | 6,39 |
| pH (CaCl ₂) | 5,39 | 4,96 | 5,06 | 5,02 | 5,42 | 5,86 |
| P (mg dm ⁻³) | 19,43 | 38,01 | 30,62 | 26,50 | 12,48 | 29,86 |
| K (mg dm ⁻³) | 180,02 | 183,05 | 190,35 | 192,12 | 206,56 | 212,24 |
| S (mg dm ⁻³) | 3,61 | 3,15 | 3,76 | 4,06 | 4,55 | 3,61 |
| Ca (cmolc dm ⁻³) | 4,26 | 3,22 | 3,97 | 3,61 | 3,74 | 4,26 |
| Mg (cmolc dm ⁻³) | 1,31 | 0,92 | 0,96 | 1,10 | 1,05 | 1,09 |
| B (mg dm ⁻³) | 0,43 | 0,40 | 0,62 | 0,49 | 0,59 | 0,61 |
| Cu (mg dm ⁻³) | 0,75 | 0,77 | 1,01 | 0,93 | 0,72 | 0,86 |
| Fe (mg dm ⁻³) | 25,01 | 28,25 | 29,16 | 28,80 | 24,15 | 23,02 |
| Mn (mg dm ⁻³) | 46,04 | 44,58 | 52,61 | 57,35 | 59,99 | 67,87 |
| Zn (mg dm ⁻³) | 22,72 | 79,52 | 27,96 | 26,21 | 14,04 | 24,80 |
| Al (cmolc dm ⁻³) | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 |
| H + Al (cmolc dm ⁻³) | 3,69 | 5,20 | 4,84 | 5,28 | 4,57 | 3,45 |
| CEC (cmolc dm ⁻³) | 9,73 | 9,82 | 10,28 | 10,48 | 9,91 | 9,35 |
| V (%) | 61,60 | 47,30 | 52,80 | 49,60 | 53,67 | 61,64 |
| m (%) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

| Manejo do solo | Profundidade (m) | | | | | |
|----------------------------------|------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| | 0,10 - 0,20 | | | | | |
| | SS | MM | MS | MBSB | MBSB-HI | MS-HI |
| pH (H ₂ O) | 5,68 | 5,57 | 5,47 | 5,44 | 5,57 | 5,89 |
| pH (CaCl ₂) | 5,11 | 4,98 | 4,83 | 4,82 | 4,95 | 5,33 |
| P (mg dm ⁻³) | 11,32 | 12,45 | 13,09 | 12,59 | 7,10 | 10,79 |
| K (mg dm ⁻³) | 120,10 | 106,78 | 155,69 | 170,10 | 138,30 | 153,52 |
| S (mg dm ⁻³) | 5,68 | 6,05 | 6,41 | 6,21 | 6,59 | 5,75 |
| Ca (cmolc dm ⁻³) | 3,97 | 4,06 | 4,32 | 3,99 | 3,74 | 5,08 |
| Mg (cmolc dm ⁻³) | 1,08 | 0,95 | 0,93 | 0,87 | 0,86 | 1,26 |
| B (mg dm ⁻³) | 0,38 | 0,44 | 0,50 | 0,69 | 0,71 | 0,64 |
| Cu (mg dm ⁻³) | 0,77 | 0,80 | 0,90 | 0,83 | 0,68 | 0,69 |
| Fe (mg dm ⁻³) | 30,01 | 33,01 | 37,09 | 30,81 | 25,39 | 21,92 |
| Mn (mg dm ⁻³) | 37,59 | 44,11 | 53,00 | 59,74 | 52,46 | 62,60 |
| Zn (mg dm ⁻³) | 8,81 | 27,01 | 10,18 | 11,78 | 6,63 | 11,62 |
| Al (cmolc dm ⁻³) | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 |
| H + Al (cmolc dm ⁻³) | 4,89 | 5,12 | 5,40 | 5,50 | 4,84 | 4,23 |
| CEC (cmolc dm ⁻³) | 10,25 | 10,39 | 11,04 | 10,82 | 9,79 | 10,97 |

| | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| V (%) | 51,60 | 51,00 | 51,20 | 49,22 | 50,60 | 61,45 |
| m (%) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária e HI = alto investimento em fertilizantes.

2.3 Amostragem de solo e planta

Após o primeiro ano de implantação do experimento, antes do plantio de cada safra amostras com estrutura preservada foram coletadas em cilindros metálicos, em duas profundidades (0-0,05 e 0,15-0,20 m), por meio de amostrador tipo Uhland para avaliação da densidade do solo (Bd). No ano de 2018 foram coletadas amostras para a modelagem do intervalo hídrico ótimo (sessão 2.4). Amostras deformadas foram coletadas com auxílio de enxadão e trado holandês para avaliação da fertilidade do solo e matéria orgânica na profundidade de 0-20 cm. O carbono orgânico total (OC) foi determinado pela conversão do teor de matéria orgânica determinado por análise química de rotina pelo fator de van Bemmelen (Tabela 3).

Tabela 3. Caracterização do carbono orgânico total para cada sistema de manejo em um Latossolo Vermelho distrófico típico em Sete Lagoas-MG nos anos 2015, 2016, 2017 e 2018.

| Manejo do solo | Carbono orgânico total (g kg ⁻¹) | | | |
|----------------|---|------|------|------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| SS | 29 | 18 | 20 | 16 |
| MM | 23 | 18 | 22 | 17 |
| MS | 24 | 19 | 25 | 16 |
| MBSB | 24 | 19 | 26 | 15 |
| MBSB-HI | 24 | 19 | 25 | 16 |
| MS-HI | 27 | 18 | 26 | 16 |

SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária e HI = alto investimento em fertilizantes.

As características agronômicas e produtividade das culturas foram avaliadas no ano de 2018. Após a maturação dos grãos as plantas foram amostradas para avaliação de número de fileiras por espiga (NRE), número de grãos por fileira (NGR), peso de 100 grãos (MSW) para o milho e número de vagens por planta (NPP), número de grãos por vagem (NGP) e peso de

100 grãos (SSW) para a cultura da soja. Foram coletadas 5 replicatas para o milho e 10 para a soja, em 3 repetições. Para o peso dos grãos, a umidade foi corrigida para 13% após secagem em estufa e determinação do peso seco. A produtividade das culturas foi expressa em produtividade relativa de grãos (RY) pela seguinte equação:

$$RY (\%) = (Y/AY)100$$

em que RY = produtividade relativa de grãos, Y = produtividade do tratamento e AY = produtividade média da cultura considerando todo o experimento.

A resistência do solo à penetração (SPR) foi estimada pela Bd para todos os anos do experimento, considerando um potencial matricial (Ψ) de -100 kPa (Peixoto et al., 2019) utilizando os parâmetros para a curva de resistência à penetração obtidos com os dados do ano de 2018 (sessão 2.4), utilizando a seguinte equação:

$$SPR = dBd^e \Psi^f \text{ (Busscher, 1990)}$$

em que SPR refere-se à resistência que o solo oferece à penetração (MPa); Ψ refere-se ao potencial matricial (kPa); d, e, f referem-se aos coeficientes obtidos no ajuste dos dados às equações e Bd refere-se à densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$).

2.4 Determinação do Intervalo Hídrico Ótimo (LLWR)

A determinação do LLWR foi realizada por meio da coleta de amostras de solo com estrutura preservada, em cilindros metálicos de volume conhecido. Com auxílio de amostrador tipo Uhland, foram amostradas as camadas 0-5 e 15-20 cm de profundidade de solo, em 3 repetições, com 7 replicatas, totalizando 252 amostras. Em laboratório, as amostras foram dispostas em bandejas com água destilada para que atingissem a saturação, e foram colocados tecidos porosos presos por elástico na parte inferior dos cilindros, de modo a impedir a perda de material sólido e possibilitar a ascensão da água no solo amostrado.

Após atingir a saturação as amostras foram pesadas para determinação do peso do solo saturado e divididas em 7 grupos de 36 amostras. Posteriormente, um grupo foi submetido aos potenciais matriciais de - 4 kPa em Funis de Büchner (Grohmann, 1960; Oliveira, 1968) onde permaneceram até que fosse cessada a drenagem. O material foi pesado para determinação do peso do solo na tensão de 4 kPa e submetido à secagem em estufa a 105 °C para determinação da massa de solo seco e cálculo da umidade do solo. Analogamente, outro grupo foi submetido

ao potencial matricial de - 6 kPa. Para os potenciais de - 33, - 100, - 500 e - 1.500 kPa cada grupo de amostras foi colocado em Extrator de Richards (Klute, 1986) e pesadas para determinação do peso em equilíbrio em cada tensão. Após atingirem o equilíbrio e pesadas em cada tensão, as amostras foram destinadas ao penetrômetro digital de bancada para quantificar a resistência à penetração do solo (SPR) conforme método descrito por (Tormena et al., 1998) e submetidas a secagem em estufa a 105 °C para determinação do peso seco.

A densidade do solo (Bd) foi determinada pelo método do anel volumétrico (Dane and Topp, 2002). O volume do cilindro foi calculado pela equação $V = \pi r^2 h$; a partir dos valores previamente obtidos do diâmetro e altura dos cilindros metálicos. Foi determinado o peso úmido do conjunto e posteriormente conduzido para estufa a 105 °C por 24 h, para obtenção o peso seco. O cálculo de Bd foi realizado utilizando o peso seco das amostras dividido pelo volume interno dos cilindros. Para a realização do teste de SPR, a força (kgf) realizada para penetrar o solo foi mensurada por meio de um penetrógrafo digital de bancada da marca Marconi, modelo MA 933, com ponteira tipo cone, ângulo de penetração equivalente a 45° e 0,00384 m de diâmetro, a uma velocidade constante de 0,01 m min⁻¹. Os valores de SPR (MPa) foram obtidos a partir da razão entre a força (kgf) e a área da ponteira conforme equação adaptada de Serafim et al. (2013):

$$SPR = Fg / (\pi r^2 / \cos 45^\circ) \times 1/106$$

$$SPR = 9,806648F / (3,1415926 \times 0,001922 / 0,7071) \times 1/106$$

$$SPR = 0,598755 \times F$$

em que SPR = resistência à penetração de raízes em (MPa); F = força obtida pelo penetrômetro (kgf); g = aceleração da gravidade (9,806648 m s⁻²); $\pi = 3,1415926$; r = raio da ponteira (0,00192 m) e $\cos 45^\circ = 0,7071$.

A determinação do LLWR foi realizada por meio da obtenção das variáveis densidade do solo (Bd), resistência à penetração (SPR), umidade volumétrica (θ), potencial matricial (Ψ) e porosidade de aeração (AFP). Para as curvas de retenção de água no solo (WRC), a relação entre θ e o Ψ associado à Bd, foi ajustada utilizando a equação do modelo descrito por Ross et al. (1991) e adaptado por Silva et al. (1994):

$$\theta = \exp(a + bBd)\Psi^c$$

em que θ refere-se ao conteúdo volumétrico de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); a, b, c referem-se aos coeficientes obtidos no ajuste dos dados às equações, Ψ refere-se ao potencial da água no solo em kPa e Bd refere-se à densidade do solo em Mg m^{-3} .

A relação de SPR e θ , foi ajustada pela equação descrita por Busscher and Sojka (1987) e utilizada por Silva et al. (1994):

$$\text{SPR} = dBd^e\theta^f$$

em que SPR refere-se à resistência que o solo oferece à penetração (MPa); θ refere-se ao conteúdo volumétrico de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); d, e, f referem-se aos coeficientes obtidos no ajuste dos dados às equações e Bd refere-se à densidade do solo (Mg m^{-3}).

A magnitude do LLWR foi calculada pela diferença entre os atributos físicos limitantes superior e inferior à capacidade de água disponível do solo (PAWC), adotando a porosidade de aeração (AFP) e umidade na capacidade de campo (θ_{FC}) como os limites superiores e SPR e umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PWP}) como limites inferiores do intervalo. Para a determinação da SPR foi adotado o valor crítico de 2,0 MPa recomendado por Taylor et al. (1966). Os valores de umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{FC}) e umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{PWP}) foram estimados pela retenção de água em equilíbrio a $\Psi = -10$ e $\Psi = -1.500$ kPa, respectivamente. O limite de $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ foi utilizado para a porosidade mínima de aeração, a qual foi determinada pela equação:

$$\theta_{AFP} = (1 - (Bd/Pd)) - 0,1$$

em que θ_{AFP} refere-se à umidade que garante a aeração mínima de $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$; Bd refere-se à densidade do solo (Mg m^{-3}) e Pd refere-se à densidade de partículas (Mg m^{-3}).

2.5 Modelagem do LLWR e análise estatística

Para a avaliação temporal, dados de outros estudos anteriores na área foram utilizados para os anos 2015, 2016 e 2017 (Batista, 2016; Mota, 2018; Moura 2018). Um bloco experimental composto por 4,4 hectares subdivididos em faixas de cultivo foi utilizado, desta forma, adotou-se o delineamento inteiramente casualizado, conforme recomendado por Ferreira et al. (2012) e adotado por Cecagno et al. (2016) e Peixoto et al. (2019). Os atributos Bd e SPR foram analisados utilizando modelos mistos lineares generalizados (GLMM) de modo a considerar a dependência da amostragem em um mesmo ponto para duas camadas do solo, bem

como para a dependência entre os anos de avaliação, exceto para a produtividade e características agrônômicas das culturas, as quais foram avaliadas apenas no ano de 2018.

A exatidão dos modelos referentes ao LLWR, curva de resistência à penetração (PRC) e curva de retenção de água (WRC) foi avaliada por meio do cálculo da raiz do erro-médio quadrático (RMSE). O coeficiente de determinação (R^2) também foi calculado para avaliar a qualidade do ajuste. Os resultados para cada tratamento nas profundidades avaliadas estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Equações utilizadas e exatidão dos modelos da curva de retenção de água (WRC) e curva de resistência à penetração (PRC) em um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG.

| Profundidade (cm) | | | |
|-------------------|--|-------|-------|
| 0 - 5 | Equação | | |
| | WRC | R^2 | RMSE |
| Manejo do solo | | | |
| SS | $\theta = \exp(-1,885+0,591*Bd)*\Psi^{-0,083}$ | 0,854 | 0,027 |
| MM | $\theta = \exp(-2,230+0,926*Bd)*\Psi^{-0,078}$ | 0,905 | 0,022 |
| MS | $\theta = \exp(-2,262+0,943*Bd)*\Psi^{-0,077}$ | 0,942 | 0,016 |
| MBSB | $\theta = \exp(-2,231+0,895*Bd)*\Psi^{-0,084}$ | 0,962 | 0,012 |
| MBSB-HI | $\theta = \exp(-2,158+0,810*Bd)*\Psi^{-0,088}$ | 0,951 | 0,016 |
| MS-HI | $\theta = \exp(-1,806+0,534*Bd)*\Psi^{-0,077}$ | 0,898 | 0,021 |
| Profundidade (cm) | | | |
| 15 - 20 | | | |
| SS | $\theta = \exp(-2,429+1,102*Bd)*\Psi^{-0,068}$ | 0,846 | 0,026 |
| MM | $\theta = \exp(-2,068+0,791*Bd)*\Psi^{-0,074}$ | 0,551 | 0,053 |
| MS | $\theta = \exp(-1,945+0,607*Bd)*\Psi^{-0,085}$ | 0,924 | 0,018 |
| MBSB | $\theta = \exp(-2,216+0,881*Bd)*\Psi^{-0,085}$ | 0,922 | 0,021 |
| MBSB-HI | $\theta = \exp(-2,767+1,358*Bd)*\Psi^{-0,094}$ | 0,930 | 0,021 |
| MS-HI | $\theta = \exp(-1,498+0,231*Bd)*\Psi^{-0,082}$ | 0,792 | 0,033 |
| Profundidade (cm) | | | |
| 0 - 5 | Equação | | |
| | PRC | R^2 | RMSE |
| Manejo do solo | | | |
| SS | $SPR = 0,038*(Bd^{10,499})*\theta^{-2,036}$ | 0,952 | 0,175 |
| MM | $SPR = 0,017*(Bd^{9,730})*\theta^{-2,993}$ | 0,816 | 0,229 |
| MS | $SPR = 0,004*(Bd^{9,870})*\theta^{-4,331}$ | 0,849 | 0,370 |
| MBSB | $SPR = 0,0000002*(Bd^{17,130})*\theta^{-12,130}$ | 0,883 | 0,351 |

| | | | |
|---------|--|-------|-------|
| MBSB-HI | $SPR = 0,013*(Bd^{7,029})*\theta^{-3,486}$ | 0,819 | 0,261 |
| MS-HI | $SPR = 0,062*(Bd^{3,263})*\theta^{-2,434}$ | 0,629 | 0,361 |

Profundidade (cm)

15 - 20

| | | | |
|---------|---|-------|-------|
| SS | $SPR = 0,015*(Bd^{7,895})*\theta^{-3,110}$ | 0,830 | 0,188 |
| MM | $SPR = 0,005*(Bd^{12,983})*\theta^{-3,791}$ | 0,706 | 0,597 |
| MS | $SPR = 0,002*(Bd^{10,015})*\theta^{-4,419}$ | 0,883 | 0,231 |
| MBSB | $SPR = 0,004*(Bd^{8,015})*\theta^{-4,508}$ | 0,687 | 0,450 |
| MBSB-HI | $SPR = 0,023*(Bd^{2,537})*\theta^{-3,153}$ | 0,579 | 0,385 |
| MS-HI | $SPR = 0,001*(Bd^{9,777})*\theta^{-5,369}$ | 0,793 | 0,383 |

SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária e HI = alto investimento em fertilizantes. RMSE = raiz quadrada do erro-médio.

A análise multivariada foi realizada utilizando o método da análise de componentes principais (PCA). A correlação entre as variáveis do estudo foi exposta em uma matriz de correlação de Pearson. Realizou-se a ANOVA e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Os procedimentos estatísticos foram realizados utilizando software R 3.6.1 (R Development Core Team, 2019) e os pacotes tidyverse (Wickham, 2017), lmerTest (Kuznetsova et al., 2014), lsmeans (Lenth, 2016) e corrplot (Taiyun Wei, 2017).

3. Resultados e Discussão

3.1 Variação temporal da estrutura do solo desde a implantação do plantio direto

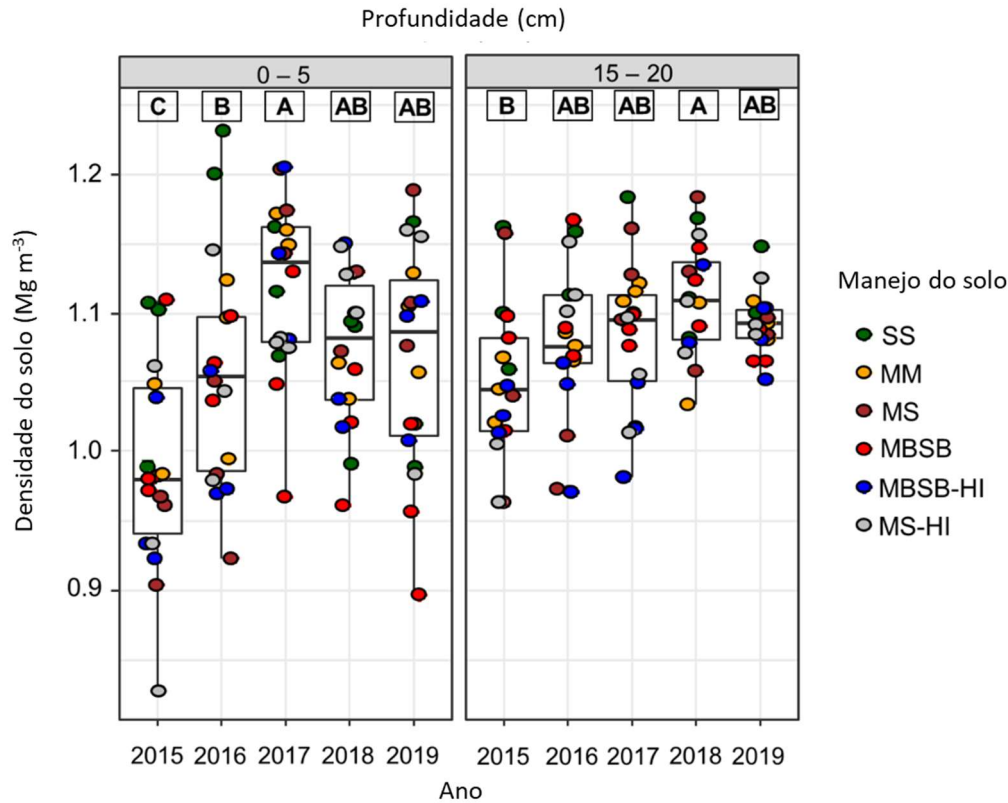
A variação de Bd nos cinco anos de avaliação está apresentada na Figura 2. Foi apresentada a variação de todos os valores de Bd para cada ano, independente dos tratamentos, para a avaliação do sistema de semeadura direta de maneira geral. Observou-se um aumento significativo progressivo nos três primeiros anos de avaliação para a camada superficial do solo. Para esta camada, nos últimos anos (2018 e 2019) o valor de Bd total foi equivalente à 2016 e 2017, entretanto a média continuou superior que 2015. Para a profundidade 15-20 cm também foi observado um aumento significativo de Bd ao longo do tempo, diferenciando os anos de 2015 e 2018 com a menor e maior Bd, respectivamente. Entretanto, considerando limites críticos de Bd para crescimento de raízes de soja e milho compilados na literatura em função da textura (Reichert et al., 2009), como 1.36 g cm^{-3} para 654 g kg de argila (Suzuki, 2005) e

1.21 g cm⁻³ para 750 gkg⁻¹ de argila (DeMaria et al., 1999) o tratamento SS foi o único que apresentou observações de Bd restritiva ao crescimento da soja, no ano de 2016.

Os resultados concordam com o padrão de variação da Bd, a qual, na camada superficial, apresenta aumento após a implantação do NT porém diminui ao longo do tempo, devido ao crescimento de raízes bem como devido a operação de semeadura (Cecagno et al., 2016; Reichert et al., 2016). Para camadas mais profundas, Bd tende a aumentar com o tempo (Reichert et al., 2016) e apresenta maior persistência ao longo do tempo comparada às camadas superficiais do solo (Hamza and Anderson, 2005). O comportamento de Bd em função do tempo concorda com a literatura, entretanto, apenas experimentos continuados de longa duração poderão comprovar a aplicabilidade desses conceitos no solo objeto deste estudo. Isso pode ocorrer devido à sua natureza pedológica que influencia suas particularidades da estrutura desse Latossolo, que apesar de muito argiloso (>600 g kg⁻¹ de argila) apresenta valores relativamente baixos de Bd, os quais são resultado de uma estrutura granular muito porosa e com alta estabilidade de agregados cimentados por óxidos de Ferro e Alumínio (Ferreira, 1999; Resende et al., 2007; Silva et al., 2015).

Cada tratamento foi identificado separadamente na Figura 2, possibilitando distinções entre si. Observa-se a concentração dos dados observados de MBSB contribuindo com menores valores de Bd na camada superficial, principalmente após o terceiro ano de avaliação. Para a camada 15-20 cm observa-se comportamento semelhante em MBSB-HI nos anos de 2016 e 2017. De forma geral, nas duas camadas avaliadas, maiores valores de Bd foram concentrados por SS, MS e MS-HI. Os menores valores de Bd encontrados nos tratamentos em consórcio com braquiária são atribuídos à inclusão da forrageira no sistema de produção, a qual apresenta uma série de benefícios físicos devido ao vigoroso crescimento radicular e, principalmente, à formação de bioporos, os quais reduzem a Bd a favorecem o desenvolvimento das raízes das culturas subsequentes (Betioli Júnior et al., 2012; Borghi and Crusciol, 2007; Calonego et al., 2011; Chen et al., 2014; Chioderoli et al., 2012; Crusciol et al., 2012).

Figura 2. Variação temporal da densidade do solo (Bd) em um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG expressada em diagrama de caixa, de todos os dados observados, nas profundidades 0-5 e 15-20 cm em função dos anos de avaliação.



Legenda: SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho-soja, MBSB = rotação milho-braquiária-soja-braquiária, HI = alto investimento em fertilizantes. Letras na parte superior do gráfico comparam as médias de Bd entre os anos de avaliação pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Dados de Bd para 2015, 2016 e 2017 estão disponíveis em Batista (2016), Moura (2018) e Mota (2018), respectivamente.

A SPR foi estimada por meio da Bd média para todos os anos de avaliação e os resultados estão apresentados na Tabela 5. Considerando a camada 15-20 cm, os tratamentos não apresentaram aumento significativo de SPR ao longo dos anos, exceto para MS-HI, o qual apresentou maior SPR em 2016 comparativamente à 2015. Na mesma camada, avaliando as diferenças entre tratamentos dentro de cada ano, não foram observadas diferenças significativas. Para a camada superficial do solo, diferenças significativas de SPR foram observadas a partir do segundo ano de avaliação. Em 2016, SS apresentou a maior SPR diferindo de todos os outros tratamentos. Em 2017, MM apresentou maior SPR comparado a

SS, MBSB e MS-HI. Em 2018 a SPR foi similar para todos os tratamentos e em 2019 MS e MS-HI apresentaram os maiores valores comparados a MBSB.

No que se refere à variação de SPR no tempo para cada tratamento, SS apresentou maior SPR em 2016, entretanto, o valor retornou à condição inicial a partir de 2017. MM e MS apresentaram aumento de SPR no ano de 2017 e que permaneceu maior que a condição inicial no ano de 2019. MBSB-HI apresentou aumento de SPR em 2017 comparado à 2015, entretanto, no ano de 2019 não houve evidências suficientes para afirmar se o valor permaneceu maior ou retornou à condição original. MBSB e MS-HI apresentaram valores similares de SPR durante os cinco anos de avaliação.

Os resultados de SPR, de maneira geral, confirmam a baixa SPR inerente aos Latossolos de estrutura granular (Ferreira et al., 1999; Ker, 1997; Leão et al., 2006; Severiano et al., 2011; Silva et al., 2015), apresentando, em todos os anos, inclusive em anos e tratamentos os quais apresentaram restrição de LLWR e aumento significativo de Bd, valores abaixo dos limites críticos de 2 e 3 MPa usualmente adotados na literatura (Chen et al., 2014; Collares et al., 2006; Leão et al., 2006; Silva et al., 1994).

SPR média não apresentou aumento significativo ao longo do tempo na camada subsuperficial em nenhum tratamento, sugerindo que os tratamentos do presente estudo não apresentam restrições mecânicas para o desenvolvimento de raízes nessa profundidade. Analogamente ao observado para Bd, MBSB não apresentou aumento de SPR com o tempo na camada superficial. Este sistema de manejo apresentou os menores valores de SPR no ano de 2019 comparado a MS-HI e MS, salientando os benefícios proporcionado pela maior diversificação de cultivos e inclusão de forrageiras na qualidade física do solo (Betoli Júnior et al., 2012; Nascente et al., 2013).

Tabela 5. Resistência do solo à penetração (SPR) para cada tratamento, nas duas profundidades de avaliação, em cada ano, estimada pela densidade do solo (Bd) em um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG (continua).

| Manejo do solo | Profundidade (cm) | | | | |
|----------------|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| | 0 - 5 | | | | |
| | Resistência à penetração (MPa) | | | | |
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |
| SS | 0,70 Ab | 1,90 Aa | 0,98 Bb | 0,66 Ab | 0,72 ABb |
| MM | 0,46 Ac | 0,88 Bbc | 1,68 Aa | 0,88 Abc | 1,03 ABb |
| MS | 0,43 Ac | 0,56 Bbc | 1,41 ABa | 1,00 Aab | 1,13 Aa |

| | | | | | |
|---------|---------|----------|----------|----------|-----------|
| MBSB | 0,75 Aa | 0,94 Ba | 0,90 Ba | 0,69 Aa | 0,48 Ba |
| MBSB-HI | 0,68 Ab | 0,77 Bab | 1,27 ABa | 0,99 Aab | 0,99 ABab |
| MS-HI | 0,68 Aa | 0,93 Ba | 0,97 Ba | 1,09 Aa | 1,04 Aa |

Profundidade (cm)

15 – 20

| | | | | | |
|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| SS | 0,92 Aa | 0,94 Aa | 0,91 Aa | 0,98 Aa | 0,94 Aa |
| MM | 0,45 Aa | 0,62 Aa | 0,92 Aa | 0,62 Aa | 0,75 Aa |
| MS | 0,71 Aa | 0,46 Aa | 0,98 Aa | 0,98 Aa | 0,82 Aa |
| MBSB | 0,87 Aa | 1,02 Aa | 0,94 Aa | 1,06 Aa | 0,89 Aa |
| MBSB-HI | 0,91 Aa | 0,92 Aa | 0,93 Aa | 0,88 Aa | 0,84 Aa |
| MS-HI | 0,33 Ab | 0,92 Aa | 0,57 Aab | 0,87 Aab | 0,79 Aab |

SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho-soja, MBSB = rotação milho-braquiária-soja-braquiária, HI = alto investimento em fertilizantes. Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas não diferem tratamentos no mesmo ano de avaliação e médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas não diferem os anos de avaliação no mesmo tratamento pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Dados de Bd para 2015, 2016 e 2017 estão disponíveis em Batista (2016), Moura (2018) e Mota (2018), respectivamente.

Os modelos de LLWR para cada tratamento estão apresentados para a profundidade 0-5 cm e 15-20 cm, nas Figura 3 e Figura 4, respectivamente. A área preenchida entre os limites inferiores e superiores dos gráficos corresponde ao LLWR ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e as barras na parte inferior do gráfico correspondem ao intervalo de confiança da média de Bd para cada ano de avaliação. Cada tratamento foi avaliado separadamente no intuito de investigar a alteração da densidade do solo e conseqüentemente do LLWR durante os primeiros cinco anos de implantação do experimento.

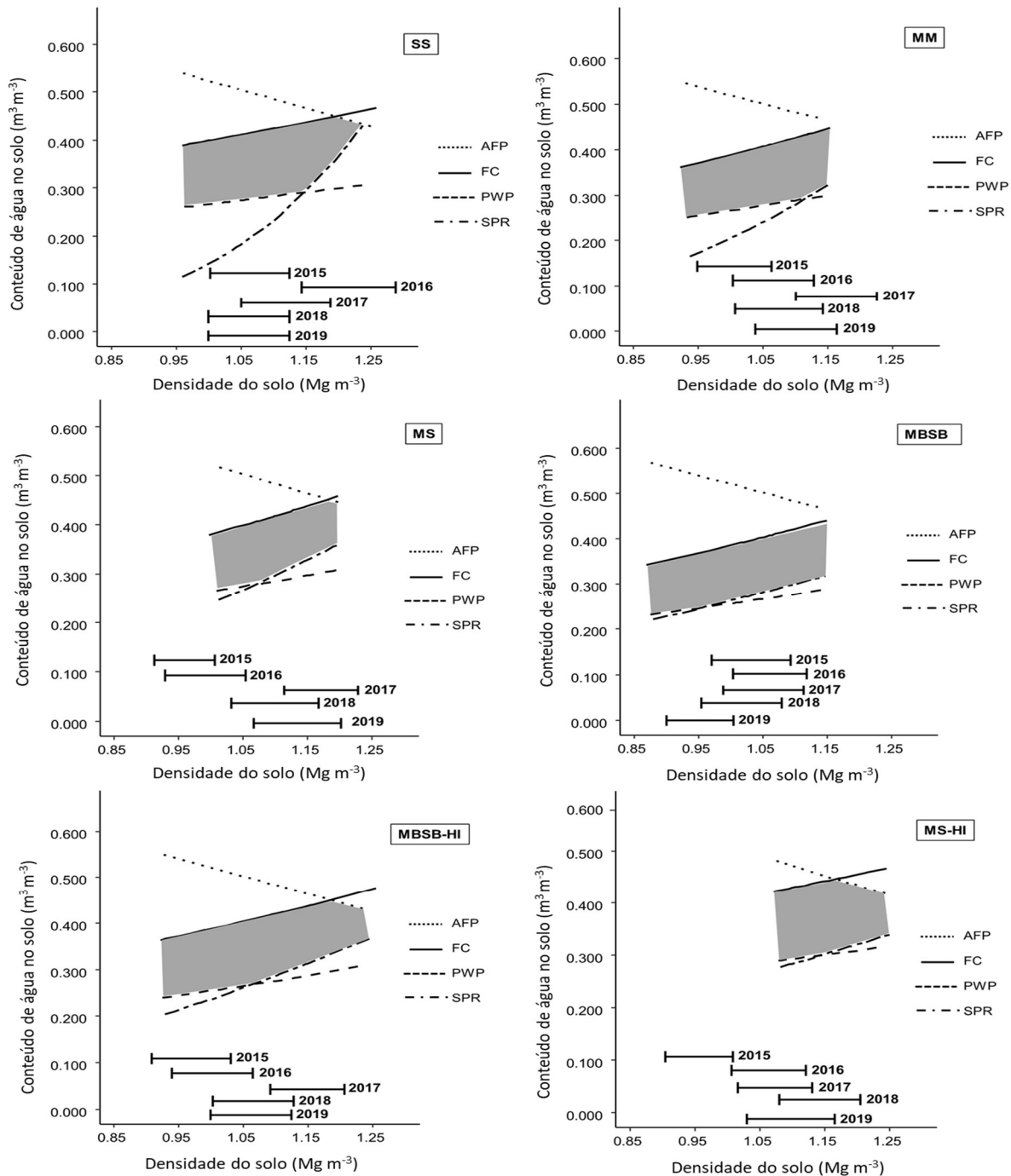
De modo geral, em todos os tratamentos os modelos (Figuras 3 e 4) mostraram restrições para a capacidade do solo de disponibilizar água a partir de um determinado valor de Bd, o qual variou com os tratamentos e tempo de amostragem. Isso mostra que há indicativo de restrição física (Silva et al., 1994), sendo a SRP mais limitante que a AFP, isto é, restrições mecânicas ocorrem em antes – menor Bd – que restrições por aeração. Essa situação se repetiu em outro Latossolo com estrutura granular estudado por Silva et al. (2015), e pode ser atribuído a grande quantidade de macroporos presentes nesses solos.

As diferenças significativas entre as densidades nos anos de avaliação foram observadas apenas na camada superficial do solo (Figura 3), o que concorda com os efeitos iniciais da implantação da semeadura direta, como o aumento de Bd e SPR, sobretudo na camada 0-10 cm

do solo (Blanco-Canqui and Ruis, 2018; Reichert et al., 2016). Com exceção de MBSB, todos os tratamentos apresentaram diferenças significativas em Bd nos anos posteriores à primeira safra. A manutenção dos níveis de Bd similares ao nível inicial em MBSB é atribuído principalmente ao agressivo desenvolvimento radicular da braquiária, o que resulta em benefícios físicos como a formação de bioporos e agregação, bem como promove uma cobertura persistente da superfície do solo (Anghinoni et al., 2019; Betioli Júnior et al., 2012; Crusciol et al., 2014; Moreira et al., 2016; Nascente et al., 2013), distribuindo a pressão aplicada pela passagem de máquinas e mitigando os efeitos de compactação do solo.

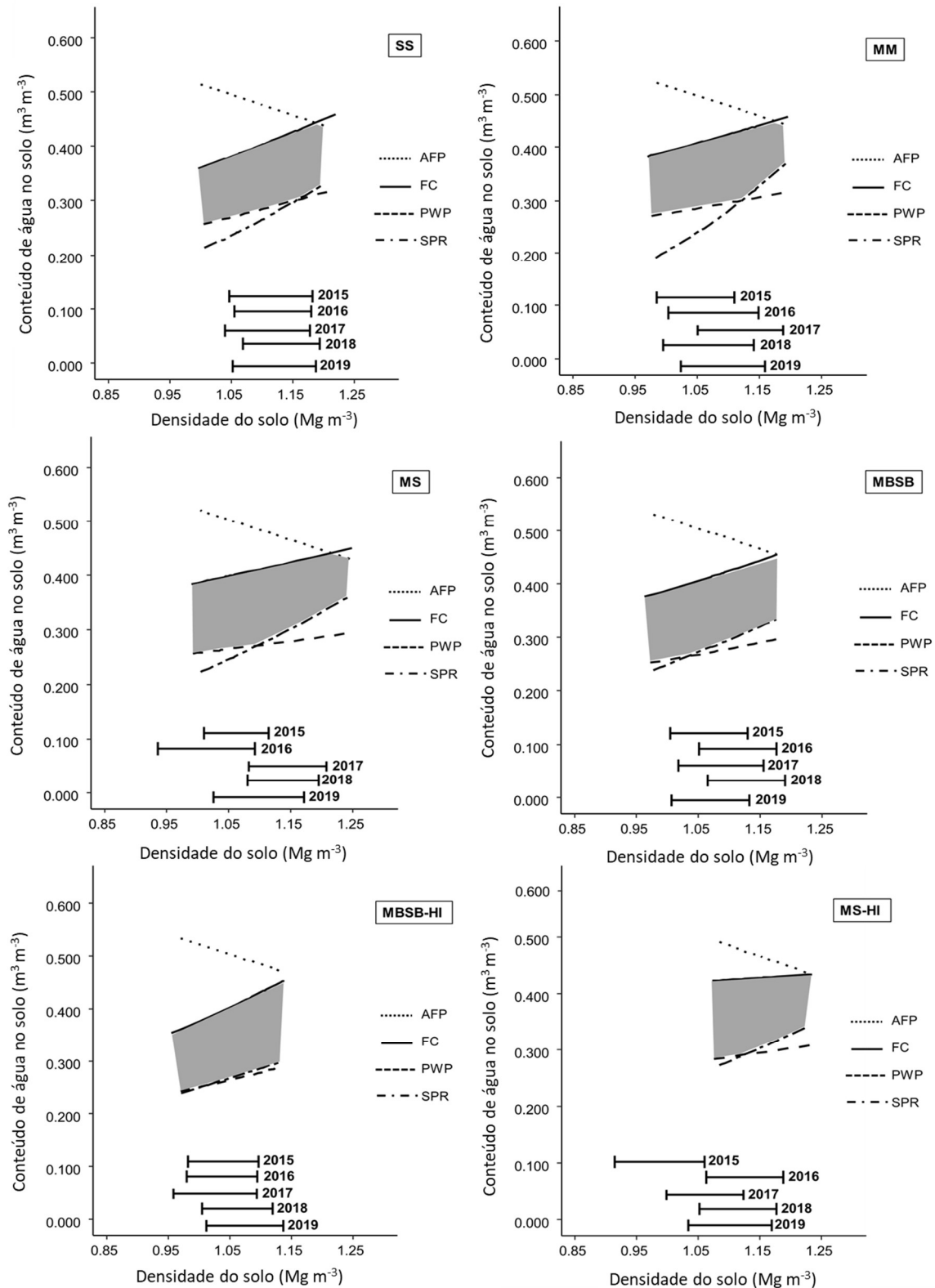
No ano de 2016, na camada superficial, SS e MBSB apresentaram restrição por SPR na Bd média, o que foi observado para MS e MBSB-HI no ano de 2017. Já ao analisar o último ano amostrado (2019), não há evidências suficientes para comprovação de restrição ao LLWR para todos os tratamentos, nas duas profundidades avaliadas, o que sugere a ausência de severas restrições físicas nos sistemas de manejo após cinco anos de cultivo. Os resultados mostram uma inicial deterioração da estrutura do solo nos primeiros anos de implantação do NT, o que pode ser avaliado pelo aumento de indicadores como Bd e SPR nas camadas superficiais devido ao permanente tráfego de máquinas e ausência de revolvimento e, apresentando, posteriormente, melhoria gradual de acordo com o tempo de adoção (Blanco-Canqui and Ruis, 2018; Reichert et al., 2016). Essa melhoria ocorre, principalmente, pelo favorecimento do crescimento radicular de culturas subsequentes pelas culturas anteriores, bem como pela manutenção da cobertura do solo e progressivo incremento de matéria orgânica na camada superficial do solo.

Figura 3. Modelos do Intervalo hídrico ótimo (LLWR) na profundidade 0-5 cm para cada tratamento em um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG.



Legenda: SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho-soja, MBSB = rotação milho-braquiária-soja-braquiária, HI = alto investimento em fertilizantes. As barras na parte inferior do gráfico representam o intervalo de confiança da média da densidade do solo (Bd) para os cinco anos de avaliação. AFP = porosidade de aeração, FC = capacidade de campo, PWP = ponto de murcha permanente, SPR = resistência à penetração. Dados de Bd para 2015, 2016 e 2017 estão disponíveis em Batista (2016), Moura (2018) e Mota (2018), respectivamente.

Figura 4. Modelos do Intervalo hídrico ótimo (LLWR) na profundidade 15–20 cm para cada tratamento em um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG.

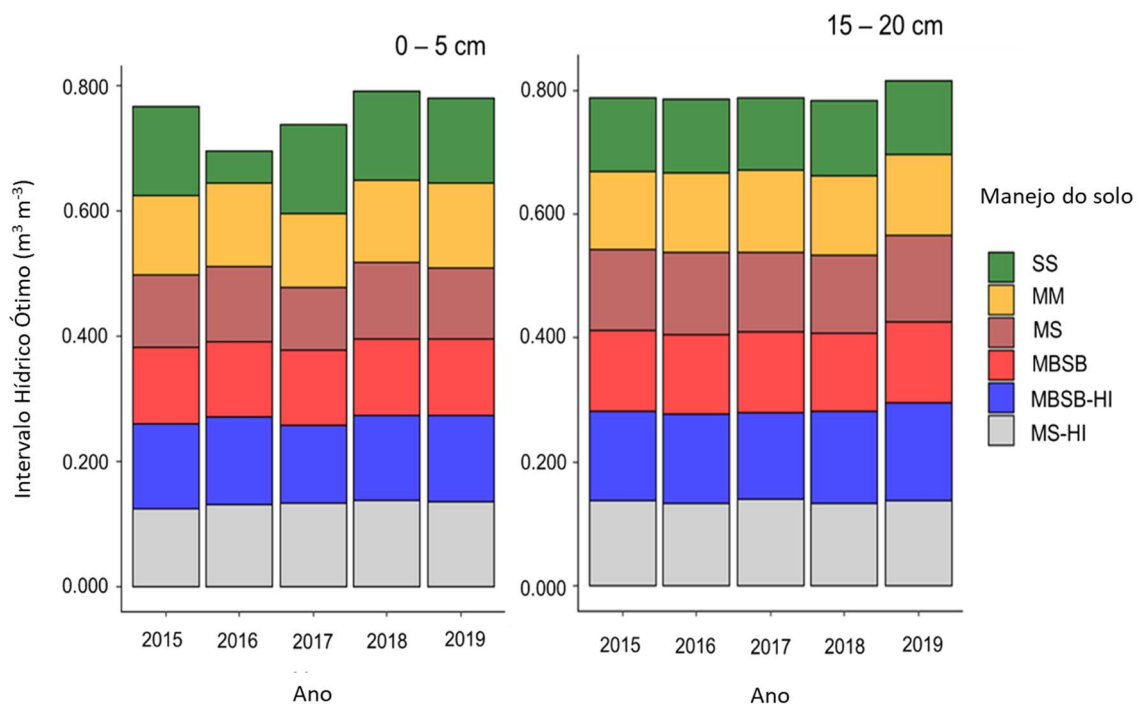


Legenda: SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho-soja, MBSB = rotação milho-braquiária-soja-braquiária, HI = alto investimento em fertilizantes. As barras na parte

inferior do gráfico representam o intervalo de confiança da média da densidade do solo (Bd) para os cinco anos de avaliação. AFP = porosidade de aeração, FC = capacidade de campo, PWP = ponto de murcha permanente, SPR = resistência à penetração. Dados de Bd para 2015, 2016 e 2017 estão disponíveis em Batista (2016), Moura (2018) e Mota (2018), respectivamente.

A variação temporal da magnitude do LLWR foi estimada pela Bd média dos tratamentos ao longo dos cinco anos de avaliação e os resultados estão apresentados na Figura 5. As alterações mais claras foram observadas apenas na camada superficial, a qual apresentou uma diminuição de LLWR de maneira geral no ano de 2016, sob influência principalmente da redução do valor de LLWR em SS. Já em 2017, a diminuição mais expressiva de LLWR foi apresentada por MS. Nos anos seguintes, todos os tratamentos e o experimento de forma geral retomaram valores de LLWR similares aos observados no ano de 2015.

Figura 5. Variação temporal do Intervalo hídrico ótimo (LLWR) estimado pela densidade média do solo (Bd) nas profundidades 0-5 e 15–20 cm para cada tratamento em um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG, em função dos anos de avaliação.



Legenda: SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho-soja, MBSB = rotação milho-braquiária-soja-braquiária, HI = alto investimento em fertilizantes.

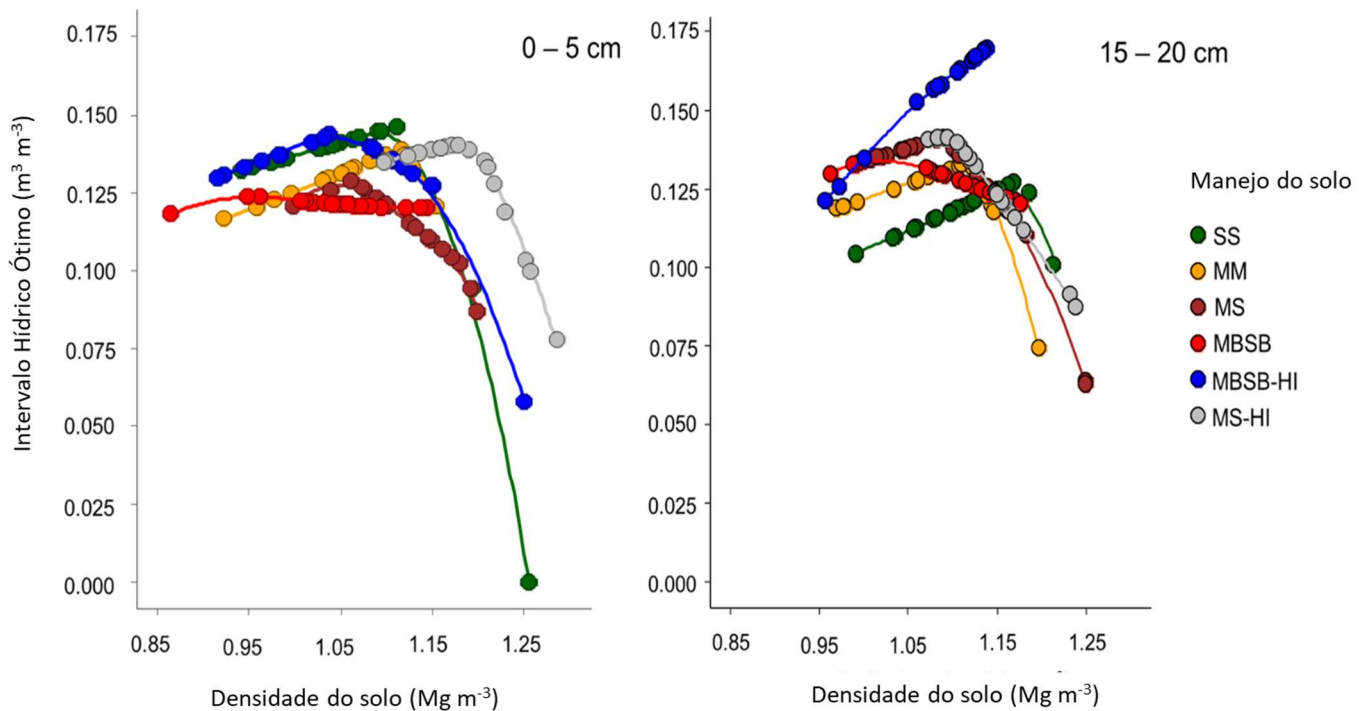
3.2 Capacidade do solo em disponibilizar água após 5 anos de manejo

Os resultados de LLWR em função de Bd modelados na safra de 2018/2019 são apresentados na Figura 6. Somente em SS foi observada a densidade do solo crítica (Bdc), na qual LLWR=0, na camada superficial do solo, com valor crítico de 1.25 Mg m^{-3} , e, portanto, indicando restrição hídrica no solo severa. Todos os tratamentos apresentaram redução da capacidade do solo em disponibilizar água para as plantas diagnosticada pelo LLWR a partir de um determinado valor de Bd avaliada, exceto MBSB-HI na camada 15-20 cm. Esse resultado sugere que o manejo em plantio direto nesse solo precisa de atenção no sentido evitar excesso de tráfego de máquinas, condições inadequadas de umidade nas operações, entre outras medidas para evitar atingir níveis de altos de Bd que tendem para Bdc, limitantes para a disponibilidade de água no solo.

MBSB-HI na camada 15-20 cm apresentou grande elevação de FC na faixa de Bd avaliada, apresentando ligeira restrição por SPR a partir de $Bd = 1.10 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 3), entretanto, o aumento de FC foi mais expressivo que o aumento de SPR, possibilitando, desta forma, que houvesse o progressivo aumento e não diminuição de LLWR com o aumento de Bd. Este resultado é atribuído aos Latossolos muito intemperizados de estrutura granular, os quais possuem baixa capacidade de disponibilizar água para as plantas (Silva et al., 2015), nos quais uma ligeira compactação pode ser benéfica no que se refere à retenção de água no solo para disponibilizar água para as plantas devido ao aumento de poros de tamanho intermediário (Resende et al., 2007). Infere-se que a faixa de Bd observada para MBSB-HI foi possivelmente uma faixa crítica de transição na distribuição de poros do solo permitindo, com o aumento de Bd, o aumento mais expressivo da retenção de água sem que houvesse grandes limitações por SPR ou aumento igualmente significativo de PWP.

MBSB apresentou baixa variação no valor de LLWR na faixa de Bd avaliada, indicando que o aumento de Bd promoveu um aumento de FC similar aos limites inferiores, sem haver diminuição expressiva de LLWR com o aumento de Bd. Desse modo, destaca-se que este tratamento foi o único que não apresentou reduções expressivas na magnitude do LLWR com o aumento da Bd na faixa de valores observada em 2018/2019. Essa ausência de possíveis restrições físicas ao crescimento vegetal, pode impactar positivamente na produtividade das culturas, o que será avaliado na sequência.

Figura 6. Intervalo hídrico ótimo (LLWR) em função da densidade do solo (Bd) nas profundidades 0-5 e 15-20 cm para cada tratamento em um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG, considerando os dados modelados em 2018.



Legenda: SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho-soja, MBSB = rotação milho-braquiária-soja-braquiária, HI = alto investimento em fertilizantes.

3.2 Desempenho agrônômico de milho e soja após 5 anos de plantio direto

Os resultados das características agrônômicas das culturas foram avaliados na safra de 2018/2019 e são apresentados na Tabela 6. Os tratamentos nos quais foi semeada a cultura da soja (SS, MBSB-HI e MS-HI) não apresentaram diferenças significativas nos parâmetros avaliados. Entretanto, considerando RY, o monocultivo de soja apresentou menor produtividade comparado a MBSB e produtividade semelhante ao monocultivo de milho. Nos tratamentos em que foi semeada a cultura do milho (MM, MS e MBSB) observou-se aumento de NRE e RY em MBSB comparado ao monocultivo.

A produtividade da cultura da soja foi extremamente baixa comparada à média de produtividade do ano registrada para o estado de Minas Gerais ($\sim 3000 \text{ kg ha}^{-1}$) (Conab, 2019). Esse resultado é explicado pelo período de estiagem de mais de 30 dias observado na região, do início de janeiro a fevereiro (Figura 2), em plena fase de formação e enchimento dos grãos

da cultura. Ademais, além do déficit de suprimento hídrico da própria cultura, o período de seca explica a ausência de efeito do maior nível de investimento em fertilizantes, possivelmente reduzindo a eficiência dos mecanismos de transporte de nutrientes e absorção pelas raízes das plantas.

Com base nos resultados de produtividade, a cultura da soja apresentou-se mais vulnerável que o milho ao período de seca registrado na região. Independente do sistema de manejo adotado, tratamentos nos quais foi semeada a cultura do milho no ano de 2018 apresentaram produtividades semelhantes ou acima da média do ano registrada para o estado de Minas Gerais ($\sim 6000 \text{ kg ha}^{-1}$) (Conab, 2019). A maior suscetibilidade ao déficit hídrico da cultura da soja em relação a cultura do milho é atribuída ao menor aprofundamento radicular (Gao et al., 2010), resultado em menor capacidade de uso da água disponível em profundidade no perfil do solo. Desta forma, o principal fator limitante à produtividade da cultura da soja foi o aspecto climático, devido aos mais de 30 dias de estiagem com altas temperaturas (Figura 2) entre os meses de janeiro e fevereiro. Considerando a “Lei de Liebig” a produtividade da cultura da soja foi limitada pela escassez hídrica, independentemente de outros fatores como investimento em fertilizantes ou qualidade física do solo (Havlin et al., 2007).

A intensificação do sistema no tratamento MBSB, o qual em 2018 esteve sob cultivo de milho, mostrou-se benéfica, aumentando a produtividade da cultura e apresentando estrutura do solo sem limitações físicas ao desenvolvimento de plantas. As vantagens do sistema mais diversificado foram consideráveis e permitem a inferência que o a rotação com braquiária não só melhorou as condições de cultivo bem como aumentaram a produtividade da cultura, evidenciando a maior influência dos benefícios da diversificação do sistema em detrimento da possível competição do milho e da braquiária, visto que foram semeadas simultaneamente. Esses resultados contribuem com outros benefícios do consórcio milho-braquiária já reportados na literatura (Borghetti et al., 2012; Garcia et al., 2008), inclusive quanto a alívio da compactação (Pariz et al., 2016).

Tabela 6. Características agronômicas e produtividade relativa (RY) para as culturas do milho e da soja na safra 2018/2019 em um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG. Soja: número de vagens por planta (NPP), número de grãos por vagem (NGP), peso de 100 grãos de soja (SSW). Milho: número de fileiras por espiga (NRE), número de grãos por fileira (NGR) e peso de 100 grãos de milho (MSW). Produtividade média da soja = 1712 kg ha⁻¹, Produtividade média de milho = 7241 kg ha⁻¹.

| Manejo do solo | Soja | | | Milho | | | RY (%) |
|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|--------------------|--------------------|----------|
| | NPP | NGP | SSW (g) | NRE | NGR | MSW (g) | |
| SS | 40,9 ^{ns} | 2,33 ^{ns} | 14,1 ^{ns} | - | - | - | 72,2 B |
| MM | - | - | - | 18,0 B | 26,6 ^{ns} | 26,6 ^{ns} | 72,0 B |
| MS | - | - | - | 18,8 AB | 27,0 | 30,3 | 105,0 AB |
| MBSB | - | - | - | 19,8 A | 25,8 | 29,5 | 138,2 A |
| MBSB-HI | 40,4 | 2,51 | 13,5 | - | - | - | 110,3 AB |
| MS-HI | 44,4 | 2,45 | 13,3 | - | - | - | 97,8 AB |

SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho-soja, MBSB = rotação milho-braquiária-soja-braquiária, HI = alto investimento em fertilizantes.

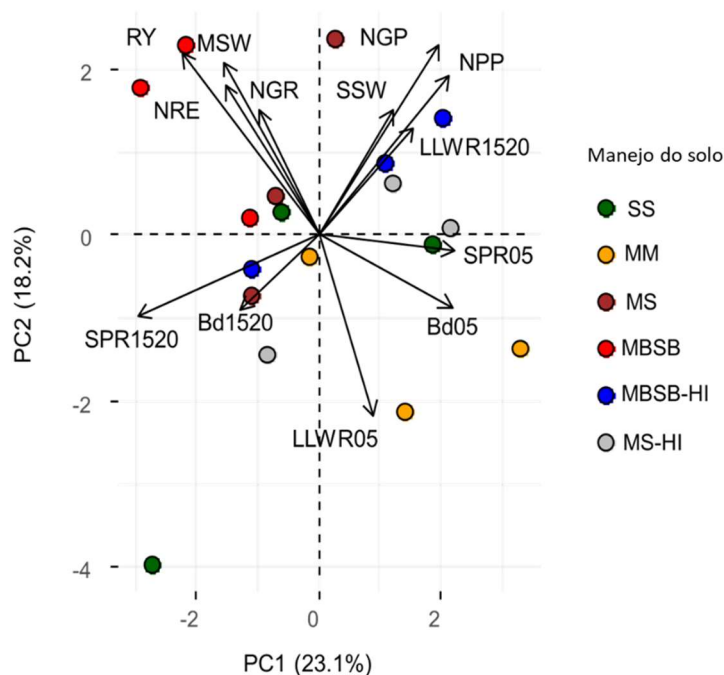
3.3 Relação entre a qualidade física do solo e o desempenho agrônômico das culturas

A análise de componentes principais (PCA) e a matriz de correlação de Pearson para as variáveis analisadas na safra 2018/2019 estão apresentadas, respectivamente, na Figura 7 e Figura 8. Na Figura 7 destacam-se, principalmente, a influência positiva de MBSB em RY e de MBSB-HI em LLWR1520. Esses resultados indicam o efeito positivo da inclusão da braquiária no sistema de plantio direto para produção de grãos, confirmando a hipótese deste trabalho. Destaca-se que a maioria de benefícios do cultivo de gramíneas em consórcio com milho e soja são reportados em sistemas para produção de forragem como sistemas de integração lavoura-pecuária (Crusciol et al., 2014, 2012; Pariz et al., 2016), diferindo ao apresentando aqui, com o objetivo de produção de grãos.

Entretanto, poucas correlações significativas foram obtidas entre as variáveis físicas e os parâmetros agrônômicos (Figura 8). Observou-se a correlação que SPR1520 apresentou correlação negativa com NPP, indicando a influência negativa da SPR no desenvolvimento radicular e potencial de produção da soja. Esse resultado está em acordo com o observado pela ausência de restrições físicas modeladas pelo LLWR para toda a faixa de Bd amostrada em MBSB-HI (Figura 3) e produtividade de soja maior em relação ao SS (Tabela 6).

O LLWR não apresentou correlação significativa com a produtividade de grãos (figura 8). Essa ausência de correlação do LLWR com a produtividade agrícola é reportada em outros trabalhos no Brasil (Cecagno et al., 2016; Gubiani et al., 2013) apesar de apresentar relação e sensibilidade em promover respostas sobre alterações estruturais no solo (Leão et al., 2006; Safadoust et al., 2014; Tormena et al., 1998). Entretanto, os resultados sugerem que isso se justifique pela ausência de correlação do RY com todos os demais atributos físicos avaliados (Bd05, Bd1520, SPR05, SPR1520) e, portanto, ausência de efeito significativo da estrutura do solo sob a produtividade de grãos, como consequência de limitações quanto a variabilidade da produção agrícola com outros fatores de produção. No caso do presente estudo, é atribuído a questão climática, notadamente pela irregularidade de oferta de chuvas (Figura 1), como discutido anteriormente, e em adição, verifica-se que os tratamentos com alto investimento em fertilidade não promoveram tendência de aumento de RY (Figura 7) e o fator disponibilidade de nutrientes é relatado como mais limitante que as condições físicas do solo (Havlin et al., 2007).

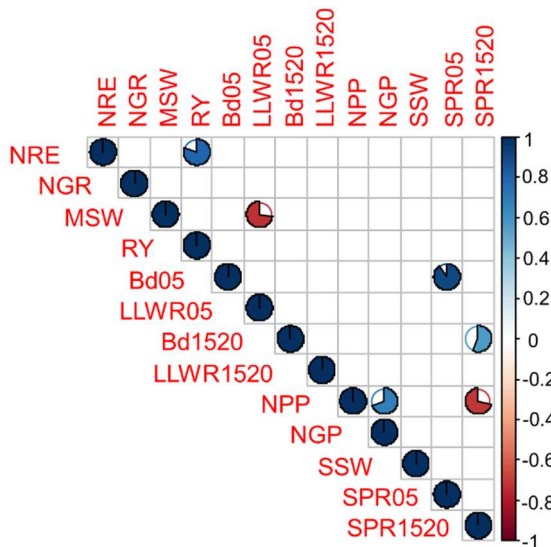
Figura 7. Análise de componentes principais considerando variáveis observadas na safra 2018/2019 em um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG.



Legenda: LLWR05 = intervalo hídrico ótimo na camada 0-5 cm, LLWR1520 = intervalo hídrico ótimo na camada 15-20 cm, Bd05 = densidade do solo na camada 0-5 cm, Bd1520 = densidade do solo na camada 15-20 cm, SPR05 = resistência à penetração na camada 0-5 cm, SPR1520 = resistência à

penetração na camada 15-20 cm. Características agronômicas: número de vagens por planta (NPP), número de grãos por vagem (NGP), peso de 100 grãos de soja (SSW), número de fileiras por espiga (NRE), número de grãos por fileira (NGR) e peso de 100 grãos de milho (MSW). SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho-soja, MBSB = rotação milho-braquiária-soja-braquiária, HI = alto investimento em fertilizantes.

Figura 8. Matriz de correlação de Pearson considerando variáveis observadas na safra 2018/2019 em um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG, apenas correlações significativas são apresentadas ($p < 0,05$).



Legenda: LLWR05 = intervalo hídrico ótimo na camada 0-5 cm, LLWR1520 = intervalo hídrico ótimo na camada 15-20 cm, Bd05 = densidade do solo na camada 0-5 cm, Bd1520 = densidade do solo na camada 15-20 cm, SPR05 = resistência à penetração na camada 0-5 cm, SPR1520 = resistência à penetração na camada 15-20 cm. Características agronômicas: número de vagens por planta (NPP), número de grãos por vagem (NGP), peso de 100 grãos de soja (SSW), número de fileiras por espiga (NRE), número de grãos por fileira (NGR) e peso de 100 grãos de milho (MSW). SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho-soja, MBSB = rotação milho-braquiária-soja-braquiária, HI = alto investimento em fertilizantes.

4. Conclusões

Os resultados do trabalho indicam, de forma geral e sem distinção de tratamentos, um aumento da Bd na camada superficial do solo nos primeiros anos de implantação do NT e, após 3 anos de cultivo, uma regressão dos valores aos patamares iniciais. Já para a camada

subsuperficial (15-20 cm) observa-se um gradual aumento de Bd, chegando no quarto ano de implantação do NT com valor superior ao inicial. Foi observada uma diminuição de LLWR de maneira geral no ano de 2016, influenciado principalmente pela redução de LLWR em SS. Já em 2017, a diminuição mais expressiva de LLWR foi apresentada por MS. Nos anos seguintes, todos os tratamentos e o experimento de forma geral retomaram valores de LLWR similares aos observados no ano de 2015. Destaca-se a influência positiva de MBSB em RY e de MBSB-HI em LLWR1520. Esses resultados indicam o efeito positivo da inclusão da braquiária no sistema de plantio direto para produção de grãos, confirmando a hipótese deste trabalho. Os resultados de LLWR, Bd e SPR, em geral, indicam para um possível estágio de equilíbrio do NT após cinco anos de cultivo, entretanto, estudos de longo prazo devem ser realizados para confirmar a dinâmica do NT em Latossolos muito intemperizados de estrutura granular.

Agradecimentos

Os autores agradecem a contribuição financeira da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) processos CAG - APQ-02075-16 e PPM-00774-18, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) processos 422538/2016-7 e 408204/2016-8, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras (DCS – UFLA). Os autores agradecem a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) pela colaboração na instalação e condução do experimento de campo. BMS agradece o CNPq pelo apoio financeiro.

Referências

- Anghinoni, G., Tormena, C.A., Lal, R., Zancanaro, L., Kappes, C., 2019. Enhancing soil physical quality and cotton yields through diversification of agricultural practices in central Brazil. *Land Degradation and Development* 30, 788–798.
<https://doi.org/10.1002/ldr.3267>
- Asmamaw, D.K., 2017. A critical review of the water balance and agronomic effects of conservation tillage under rain-fed agriculture in Ethiopia. *Land Degradation and Development* 855, 843–855. <https://doi.org/10.1002/ldr.2587>
- Batista, A. M., 2016. Caracterização física do solo em fase inicial de estabelecimento de

sistemas intensivos de produção de grãos. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de São João Del-Rei. 1-58.

- Betioli Júnior, E., Moreira, W.H., Tormena, C.A., Ferreira, C.J.B., Silva, A.P., Giarola, N.F.B., 2012. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um latossolo vermelho após 30 anos sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 36, 971–982.
- Blanco-Canqui, H., Ruis, S.J., 2018. No-tillage and soil physical environment. *Geoderma* 326, 164–200. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011>
- Blevins, R.L., Cook, D., Phillips, S.H., Phillips, R.E., 1971. Influence of No-tillage on Soil Moisture. *Agronomy Journal* 1–4.
- Borghi, E., Crusciol, C.A.C., 2007. Produtividade de milho , espaçamento e modalidade de consorciação com *Brachiaria brizantha* em sistema plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 42, 163–171.
- Borghi, É., Crusciol, C.A.C., Nascente, A.S., Mateus, G.P., Martins, P.O., Costa, C., 2012. Effects of row spacing and intercrop on maize grain yield and forage production of palisade grass. *Crop and Pasture Science* 63, 1106–1113. <https://doi.org/10.1071/CP12344>
- Brito Galvão, T.C., Schulze, D.G., 1996. Mineralogical Properties of a Collapsible Lateritic Soil from Minas Gerais, Brazil. *Soil Science Society of America Journal* 60, 1969–1978.
- Busscher, W.J., 1990. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. <https://doi.org/10.13031/2013.31360>
- Busscher, W.J., Sojka, R.E., 1987. Enhancement of subsoiling effects on soil strength by conservation tillage. *Transactions of the ASAE* 30, 888–892.
- Calonego, J C Borghi, E Crusciol, C.A.C., 2011. Intervalo Hídrico Ótimo e compactação do solo com cultivo consorciado de milho e braquiária. *R. Bras. Ci. Solo* 35, 2183–2190.
- Cecagno, D., de Andrade Costa, S.E.V.G., Anghinoni, I., Kunrath, T.R., Martins, A.P., Reichert, J.M., Gubiani, P.I., Balerini, F., Fink, J.R., de Faccio Carvalho, P.C., 2016. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. *Soil and Tillage Research* 156, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.005>

- Chen, G., Weil, R.R., Hill, R.L., 2014. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. *Soil and Tillage Research* 136, 61–69.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.004>
- Chioderoli, C.A., Mello, L.M.M. De, Grigolli, P.J., Furlani, C.E.A., Silva, J.O.R., Cesarin, A.L., 2012. Atributos físicos do solo e produtividade de soja em sistema de consórcio milho e braquiária *Physycal properties of soil and yield of soybeans in corn braquiaria consortium* 37–43.
- Collares, G.L., Reinert, D.J., Reichert, J.M., Kaiser, D.R., 2006. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 41, 1663–1674. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006001100013>
- Conab, 2019. Acompanhamento da safra brasileira de grãos 2018/19.
- Crusciol, C.A.C., Mateus, G.P., Nascente, A.S., Martins, P.O., Borghi, E., Pariz, C.M., 2012. An innovative crop-forage intercrop system: Early cycle soybean cultivars and palisadegrass. *Agronomy Journal* 104, 1085–1095.
<https://doi.org/10.2134/agronj2012.0002>
- Crusciol, C.A.C., Nascente, A.S., Mateus, G.P., Pariz, C.M., Martins, P.O., Borghi, E., 2014. Intercropping soybean and palisade grass for enhanced land use efficiency and revenue in a no till system. *European Journal of Agronomy* 58, 53–62.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.05.001>
- Dane, J.H., Topp, G.C., 2002. *Methods of Soil Science Part 4 Physical Methods*.
- DeMaria, I.C., Castro, O.M., Dias, H.S., 1999. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 703–709.
- Derpsch, R., Friedrich, T., Kassam, A., Hongwen, L., 2010. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *Int J Agric & Biol Eng* 3, 01-25.
<https://doi.org/10.3965/j.issn.1934-6344.2010.01.001-025>
- Dexter, A.R., 2004. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120, 201–214.
<https://doi.org/10.1016/j.geodermaa.2003.09.005>
- Ferreira, D.F., Cargnelutti Filho, A., Lúcio, A.D., 2012. Procedimentos estatísticos em

- planejamentos experimentais com restrição na casualização. *Boletim Informativo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo* 37, 9–9.
- Ferreira, M.M., Fernandes, B., Curi, N., 1999. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 23, 515–524.
- Gao, Y., Duan, A., Qiu, X., Liu, Z., Sun, J., Zhang, J., Wang, H., 2010. Distribution of roots and root length density in a maize/soybean strip intercropping system. *Agricultural Water Management* 98, 199–212. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.08.021>
- Garcia, R.A., Crusciol, C.A.C., Calonego, J.C., Rosolem, C.A., 2008. Potassium cycling in a corn-brachiaria cropping system. *European Journal of Agronomy* 28, 579–585. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.01.002>
- Grohmann, F., 1960. Distribuição tamanho de poros em três tipos de solos do estado de São Paulo. *Bragantia - Boletim Técnico do Instituto Agronomico do Estado de São Paulo*.
- Gubiani, P.I., Reichert, J.M., Reinert, D.J., 2013. Indicadores hídrico-mecânicos de compactação do solo e crescimento de plantas. *Revista Brasileira De Ciencia Do Solo* 37, 1–10.
- Hamza, M.A., Anderson, W.K., 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research* 82, 121–145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
- Havlin, J.H., Tisdale, S.L., Beaton, J.D., Nelson, W.L., 2007. *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. 1-261.
- Kassam, A., Friedrich, T., Derpsch, R., 2018. Global spread of Conservation Agriculture. *International Journal of Environmental Studies* 00, 1–23. <https://doi.org/10.1080/00207233.2018.1494927>
- Ker, J.C., 1997. Latossolos do Brasil: Uma revisão. *Geonomos* 5, 17–40.
- Klute, A., 1986. Water retention: laboratory methods, in: *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. ASA and SSSA, Madison. pp. 635–662. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c26>
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., & Christensen, R.H.B., 2014. lmerTest: tests for random

- and fixed effects for linear mixed effect models (lmer objects of lme4 package). R package version 2.0-6. Retrieved in July 7.
- Lal, R., Reicosky, D.C., Hanson, J.D., 2007. Evolution of the plow over 10 , 000 years and the rationale for no-till farming. *Soil & Tillage Research* 93, 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2006.11.004>
- Leão, T.P., da Silva, A.P., Macedo, M.C.M., Imhoff, S., Euclides, V.P.B., 2006. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. *Soil and Tillage Research* 88, 279–285. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.06.014>
- Lenth, R. V., 2016. Least-squares means: The R package lsmeans. *Journal of Statistical Software* 69. <https://doi.org/10.18637/jss.v069.i01>
- Letey, J., 1985. Relationship between Soil Physical Properties and Crop Production. *Advances in Soil Science* 1, 277–293.
- Moreira, W.H., Tormena, C.A., Karlen, D.L., Silva, A.P., Keller, T., Betioli Júnior, E., 2016. Seasonal changes in soil physical properties under long-term no-tillage. *Soil & Tillage Research* 160, 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.02.007>
- Mota, P. K., 2018. Indicadores de qualidade física do solo em sistemas intensificados de produção de grãos no Cerrado mineiro. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São João Del-Rei. 1-48.
- Moura, M. S., 2018. Intervalo Hídrico Ótimo e produtividade de grãos em função do manejo no estabelecimento de plantio direto. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São João Del-Rei. 1-54.
- Nascente, A.S., Crusciol, C.A.C., Cobucci, T., 2013. The no-tillage system and cover crops — Alternatives to increase upland rice yields. *European Journal of Agronomy* 45, 124–131. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.09.004>
- Oliveira, L.B., 1968. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada. *Pesquisa agropecuária brasileira* 3, 197–200.
- Pariz, C.M., Costa, C., Crusciol, C.A.C., Meirelles, P.R.L., Castilhos, A.M., Andreotti, M., Costa, N.R., Martello, J.M., Souza, D.M., Sarto, J.R.W., Franzluebbbers, A.J., 2016.

- Production and soil responses to intercropping of forage grasses with corn and soybean silage. *Agronomy Journal* 108, 2541–2553. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.02.0082>
- Peixoto, D.S., Silva, B.M., de Oliveira, G.C., Moreira, S.G., da Silva, F., Curi, N., 2019. A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. *Soil and Tillage Research* 194, 104307. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104307>
- Pittelkow, C.M., Linquist, B.A., Lundy, M.E., Liang, X., van Groenigen, K.J., Lee, J., van Gestel, N., Six, J., Venterea, R.T., van Kessel, C., 2015. When does no-till yield more? A global meta-analysis. *Field Crops Research* 183, 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.020>
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., Vogel, H.J., 2018. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma* 314, 122–137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
- Reichert, J.M., da Rosa, V.T., Vogelmann, E.S., da Rosa, D.P., Horn, R., Reinert, D.J., Sattler, A., Denardin, J.E., 2016. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. *Soil and Tillage Research* 158, 123–136. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.11.010>
- Reichert, J.M., Suzuki, L.E.A.S., Reinert, D.J., Horn, R., Hakansson, I., 2009. Soil & Tillage Research Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil & Tillage Research* 102, 242–254. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>
- Resende, M., Curi, N., Rezende, S.B., Corrêa, G.F., 2007. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. Lavras: Editora UFLA 5. ed. rev, 322 p.
- Resende, A. V., Silva, A.F., Borghi, E., Gontijo Neto, M.M., Shiratsuchi, L.S., Pitta, R.M., Ferreira, A., 2016. Tomada de decisão quanto a adubação e manejo de nutrientes por agricultores do Mato Grosso: dados do Circuito Tecnológico 2015. Documentos/Embrapa Milho e Sorgo.
- Reynolds, W.D., Bowman, B.T., Drury, C.F., Tan, C.S., Lu, X., 2002. Indicators of good soil physical quality: Density and storage parameters. *Geoderma* 110, 131–146. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00228-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00228-8)

- Ross, P.J., Williams, J., Bristow, K.L., 1991. Equation for Extending Water-Retention Curves to Dryness. *Soil Science Society of America Journal* 55, 923–927.
- Safadoust, A., Feizee, P., Mahboubi, A.A., Gharabaghi, B., Mosaddeghi, M.R., Ahrens, B., 2014. Least limiting water range as affected by soil texture and cropping system. *Agricultural Water Management* 136, 34–41.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.01.007>
- Santos, H.G., Jacomine, P.K.T., Anjos, L.H.C., Oliveira, V.A., Oliveira, J.B., Coelho, M.R., Lumberras, J.F., Cunha, T.J.F., 2013. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos 3^a edição revista e ampliada. [https://doi.org/ISBN 978-85-7035-198-2](https://doi.org/ISBN%20978-85-7035-198-2)
- Serafim, M.E., de Oliveira, G.C., Vitorino, A.C.T., Silva, B.M., Carducci, C.E., 2013. Qualidade Física E Intervalo Hídrico Ótimo Em Latossolo E Cambissolo, Cultivados Com Cafeeiro, Sob Manejo Conservacionista Do Solo. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 37, 733–742. <https://doi.org/10.1590/S0100-068320130003000020>
- Severiano, E.C., Oliveira, G.C., Dias Júnior, M.S., Costa, K.A.P., Silva, F.G., Ferreira Filho, S.M., 2011. Structural changes in Latosols of the Cerrado region: I - Relationships between soil physical properties and least limiting water range. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 35, 773–782.
- Silva, A.P., Kay, B.D., Perfect, E., 1994. Characterization of the Least Limiting Water Range of Soils. *Soil Science Society of America Journal* 58, 1775–1781.
- Silva, B.M., Oliveira, G.C., Serafim, M.E., da Silva, E.A., Ferreira, M.M., Norton, L.D., Curi, N., 2015. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. *Soil & Tillage Research* 154, 103–113.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.013>
- Soil Survey Staff, 2014. Keys to soil taxonomy. *Usda* 12, 410.
<https://doi.org/10.1109/TIP.2005.854494>
- Srayeddin, I., Doussan, C., 2009. Estimation of the spatial variability of root water uptake of maize and sorghum at the field scale by electrical resistivity tomography. *Plant and Soil* 319, 185–207. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9860-5>
- Suzuki, L.E.A.S., 2005. Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas. Dissertação de Mestrado. Universidade

Federal de Santa Maria.

Taiyun Wei, M., 2017. Title Visualization of a Correlation Matrix. *Statistician* 56, 316–324.

Taylor, H.M., Roberson, G.M., Parker Jr, J.J., 1966. Soil strength-root penetration relations for medium-to coarse-textured soil materials. *Soil Science* 102, 18–22.

Topp, G.C., Reynolds, W.D., Cook, F.J., Kirby, J.M., Carter, M.R., 1997. Chapter 2 Physical attributes of soil quality. *Developments in Soil Science* 25, 21–58.

[https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(97\)80029-3](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(97)80029-3)

Tormena, C.A., da Silva, Á.P., Libardi, P.L., 1998. Characterization of the Least Limiting Water Range of an Oxisol Under No-Tillage. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 22, 573–581. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000400002>

Wickham, H., 2017. Package “tidyverse.” *Cran-R* 1–5.

Artigo III:

Qualidade física do solo, erosão hídrica e produtividade de sistemas de produção de grãos na região central de Minas Gerais

Artigo formatado nas normas da Revista Science of the Total Environment
(versão preliminar)

Resumo

A qualidade física do solo determina, entre outros fatores, a capacidade de infiltração de água bem como a percolação de água no perfil, desta forma, influenciando diretamente o processo erosivo. Os efeitos da erosão ocasionam prejuízo direto aos produtores, os quais são onerados por meio da degradação do solo, sobretudo pela perda de nutrientes, comprometendo a produtividade da área. O objetivo do trabalho foi avaliar sistemas de produção de grãos em plantio direto investigando os efeitos de níveis de investimento em fertilizantes e diferentes sistemas de rotação de culturas na qualidade física do solo, nas perdas de solo, água e nutrientes e na produtividade das culturas, comparados à monocultivos de soja e milho no quinto ano agrícola após implantação do sistema plantio direto (NT). A hipótese testada foi que a inclusão da braquiária no sistema de rotação promove maior cobertura do solo pela substancial produção de biomassa da gramínea, impedindo o impacto direto da gota de chuva na superfície, resultando em diminuição do escoamento superficial e consequente perda de solo por erosão hídrica. A intensificação do sistema no tratamento MBSB, o qual em 2018 esteve sob cultivo de milho, mostrou-se benéfica, aumentando a produtividade da cultura, melhorando a estrutura do solo, aumentando a taxa de cobertura e reduzindo as perdas de solo, água e nutrientes. O monocultivo de soja aparentou alta suscetibilidade ao processo erosivo, com perdas similares ao solo descoberto. As correlações entre perdas de água, perdas de solo e perdas de nutrientes com a produtividade das culturas evidenciou os efeitos nocivos do processo erosivo no desempenho dos cultivos. De forma geral, a taxa de cobertura do solo foi o principal fator regulador dos processos de escoamento superficial, erosão e perdas de nutrientes nas condições estudadas. Os resultados alertam para a necessidade da diversificação dos cultivos (intensificação ecológica) e produção de cobertura adequada no NT, de modo a promover a conservação do solo, da água, reduzir impactos ambientais e aumentar a produtividade e consequente rentabilidade dos cultivos.

Palavras-chave: perdas de solo, escoamento superficial, rotação de culturas

Abstract

The soil physical quality determines, among other factors, the capacity of water infiltration, thus directly influencing the erosion process. The effects of erosion cause direct damage to farmers, who are burdened by soil degradation, especially due to nutrients losses, compromising the crop yield. The aim of the study was to evaluate no-till systems investigating the effects of different investment levels in fertilizers and different crop rotation systems on soil physical quality, soil, water and nutrient losses and crop yield, comparing to soybean and maize monocultures in the fifth agricultural year after implantation of the no-tillage system (NT). The hypothesis was that the inclusion of brachiaria in the crop rotation system promotes greater soil cover by the substantial production of grass biomass, preventing the direct impact of raindrop on soil surface, resulting in decreased runoff and consequent decreasing soil losses by water erosion. maize and brachiaria intercropping proved to be beneficial, increasing crop yield, improving soil structure, increasing soil cover rate and reducing soil, water and nutrient losses. Soybean monoculture showed high susceptibility to erosion process, with losses similar to bare soil. The correlations between water, soil, and nutrient losses with crop yield showed the harmful effects of the erosion process on the agronomic performance of crops. In general, the soil cover rate was the main regulating factor in the processes of runoff, erosion and loss of nutrients in the studied conditions. The results alert to the need for diversification of crops (ecological intensification) and production of adequate cover in the NT, in order to promote the conservation of soil, water, reduce environmental impacts and increase productivity and consequent profitability of crops.

Keyword: soil losses, runoff, crop rotation

1. Introdução

O Sistema Plantio Direto (NT) progressivamente despertou o interesse de produtores pela eficiência na conservação do solo e da água bem como pela redução do trabalho necessário para o preparo de solo convencional, resultando em economia de tempo e combustível e assim maior retorno econômico (Blevins et al., 1971; Derpsch et al., 2010; Lal et al., 2007). Estima-se que 180 milhões de hectares estejam sob NT em nível mundial (Kassam et al., 2018) e 32 milhões de hectares no Brasil (Peixoto et al., 2019). O NT é um conjunto de práticas conservacionista para agricultura o qual possui três pilares em sua definição: ausência ou mínimo revolvimento do solo, manutenção permanente de cobertura vegetal na superfície e diversificação de espécies de plantas (Kassam et al., 2018). Entretanto, esses pilares podem não ser plenamente satisfeitos, por diversas razões como por exemplo limitações edafoclimáticas, e assim o sucesso agrícola com o NT pode ser comprometido.

Os Latossolos constituem a classe de solo dominante do Brasil, correspondendo a mais de 60% da superfície do país (Schaefer et al., 2008) e aproximadamente metade da área do bioma Cerrado (Eberhardt et al., 2008). Os Latossolos do Cerrado apresentam alto grau de intemperismo e comumente exibem severa restrição química ao desenvolvimento de plantas. Em geral, esses solos possuem baixa capacidade de troca catiônica (CEC) alta saturação por alumínio e baixa disponibilidade de nutrientes (Goedert, 1983; Lopes, 1984; Lopes and Cox, 1977), todavia, quando solucionadas as limitações químicas com o aporte de corretivos e fertilizantes, apresentam alto potencial produtivo (Castro and Crusciol, 2013; Goedert, 1983).

A mineralogia oxidica, principalmente sob influência da gibbsita, presente na fração argila dos Latossolos do Cerrado, desempenha papel fundamental na estruturação desses solos gerando uma estrutura granular fortemente desenvolvida (Ferreira et al., 1999; Ker, 1997). A estrutura granular confere ao solo condições físicas favoráveis ao crescimento de plantas, apresentando, em geral, baixa densidade, alta macro e microporosidade, alta estabilidade de agregados, alta taxa de infiltração e baixa resistência mecânica à penetração de raízes, além da incidência majoritária em relevo suavizado, conveniente à exploração agrícola mecanizada em larga escala (Goedert, 1983; Ker, 1997; Ferreira et al., 1999; Leão et al., 2006; Resende et al., 2007; Severiano et al., 2011; Silva et al., 2015). Todavia, esses solos apresentam, apesar da alta retenção de água, baixa capacidade de água disponível para as plantas (CAD), devido a transição abrupta de poros muito grandes para poros muito pequenos (Carducci et al., 2013; Silva et al., 2015; Silva et al., 2014).

A região central do estado de Minas Gerais, inserida no bioma Cerrado, apresenta regime de chuvas mal distribuído, com volume de precipitação concentrado entre os meses de outubro a abril, o que limita a atividade agrícola em condições de sequeiro fora deste período. Ademais, a ocorrência de veranicos na safra de verão é recorrente, o que compromete a produtividade das lavouras devido ao déficit hídrico. Essa condição de escassez hídrica requer manejo rigoroso e impõe aos sistemas de produção atuais o desafio de atingir altas produtividades otimizando o uso de água pelas culturas (Srayeddin and Doussan, 2009). A baixa disponibilidade de água decorrente da sazonalidade de chuvas e da capacidade do solo (baixa CAD) pode ser acentuada caso haja degradação da estrutura do solo, comprometendo sua qualidade física e diminuindo a retenção de água na faixa disponível para as plantas (Safadoust et al., 2014), com impactos sobre a produtividade vegetal (Cherubin et al., 2016; Severiano et al., 2011).

A qualidade física do solo determina, entre outros fatores, a capacidade de infiltração de água bem como a percolação de água no perfil, desta forma, influenciando diretamente o processo erosivo. A intensificação da erosão hídrica culmina na degradação do solo, que pode ser compreendida por meio de diversos danos físicos, químicos e biológicos. Podem ser destacados como consequências físicas o selamento superficial, compactação, diminuição da macroporosidade do solo e taxa de infiltração, bem como efeitos químicos e biológicos como a eutrofização e poluição de recursos hídricos, acidificação e salinização do solo, diminuição da CEC, diminuição do teor de matéria orgânica do solo, diminuição da biomassa, atividade e diversidade microbiana e aumento da emissão de gases de efeito estufa (Blanco-Canqui and Lal, 2008; Panagos et al., 2018).

O carreamento de partículas pelo escoamento superficial causa a remoção da camada superficial do solo, na qual se concentram os insumos aportados pela prática agrícola, como fertilizantes e defensivos (Blanco-Canqui and Lal, 2008). Os efeitos da erosão ocasionam prejuízo direto aos produtores, os quais são onerados por meio da degradação do solo, sobretudo pela perda de nutrientes, comprometendo a produtividade da área (Panagos et al., 2018; Pimentel et al., 1995). Além dos danos diretos, há ainda os indiretos como assoreamento e eutrofização de corpos d'água devido ao transporte dos insumos da área cultivada para a calha dos rios (Blanco-Canqui and Lal, 2008), os quais são pagos pela sociedade em geral (Panagos et al., 2018), desta forma, a erosão apresenta não somente ameaça à atividade agrícola e à conservação ambiental como também têm influências socioeconômicas (Borrelli et al., 2017).

Sistemas de produção que promovam o uso racional dos recursos hídricos e priorizem a conservação do solo e da água são fundamentais para o futuro sustentável da atividade agrícola

(Iglesias and Garrote, 2015). Práticas que resultem no aumento da infiltração e do armazenamento de água no solo para atender a demanda vegetal, bem como promovam o aprofundamento radicular para permitir o acesso das plantas à umidade em camadas mais profundas e que resultem em incremento da matéria orgânica e redução da compactação do solo são essenciais para o êxito da produção (Carducci et al., 2013; Cherubin et al., 2016; Dexter, 2004; Silva et al., 2015). A adoção e o manejo adequado de sistemas conservacionistas, sobretudo que forneçam adequada cobertura ao solo, ademais, são cruciais para evitar as perdas de água por escoamento superficial e evaporação, constituindo um fator chave para o incremento da produtividade das culturas, especialmente em locais que pratiquem a agricultura de sequeiro (Asmamaw, 2017; Dexter, 2004).

Diante do exposto, o trabalho objetivou avaliar sistemas de produção de grãos em plantio direto investigando os efeitos de níveis de investimento em fertilizantes e diferentes sistemas de rotação de culturas na qualidade física do solo, nas perdas de solo, água e nutrientes e na produtividade das culturas, comparados à monocultivos de soja e milho no quinto ano agrícola após implantação do NT. A hipótese testada foi que a inclusão da braquiária no sistema de rotação promove maior cobertura do solo pela substancial produção de biomassa da gramínea, impedindo o impacto direto da gota de chuva na superfície, resultando em diminuição do escoamento superficial e consequente perda de solo por erosão hídrica, bem como, devido ao vigoroso sistema radicular, promover benefícios físicos como estruturação e agregação do solo (Borghini and Crusciol, 2007; Calonego et al., 2011; Chioderoli et al., 2012; Crusciol et al., 2014, 2012).

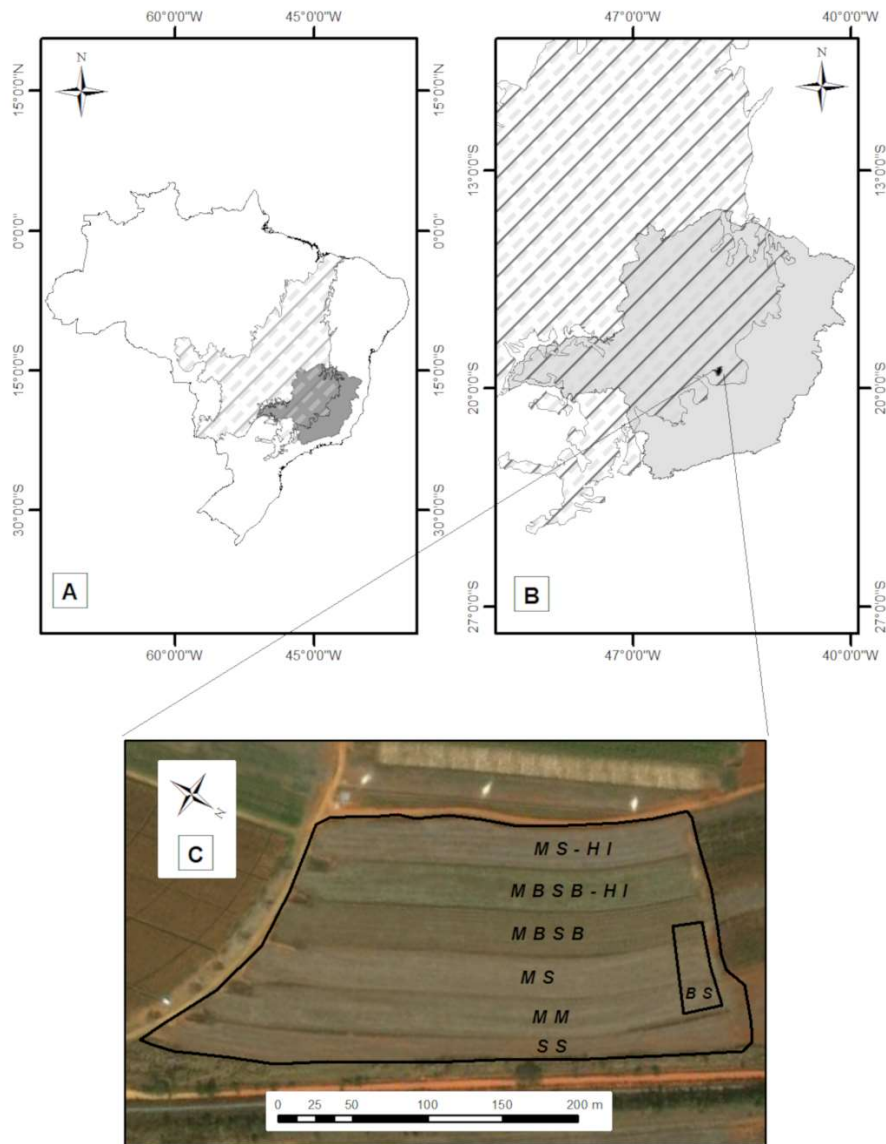
2. Material e Métodos

2.1 Área experimental

O trabalho foi conduzido na fazenda experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) – Centro Nacional de Pesquisa em Milho e Sorgo, localizada no município de Sete Lagoas, Minas Gerais, coordenadas geográficas 19°28'30'' S, 44°15'08'' W. O clima predominante na região conforme classificação de Köppen é subtropical úmido (Cwa), apresentando temperatura média anual de 22,1 °C e pluviosidade média anual de 1.382,7 mm, com regime de chuvas irregular, concentradas no período de outubro a abril. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (Santos et al., 2013), correspondente a Typic Haplustox (Soil Survey Staff, 2014) de mineralogia composta majoritariamente por

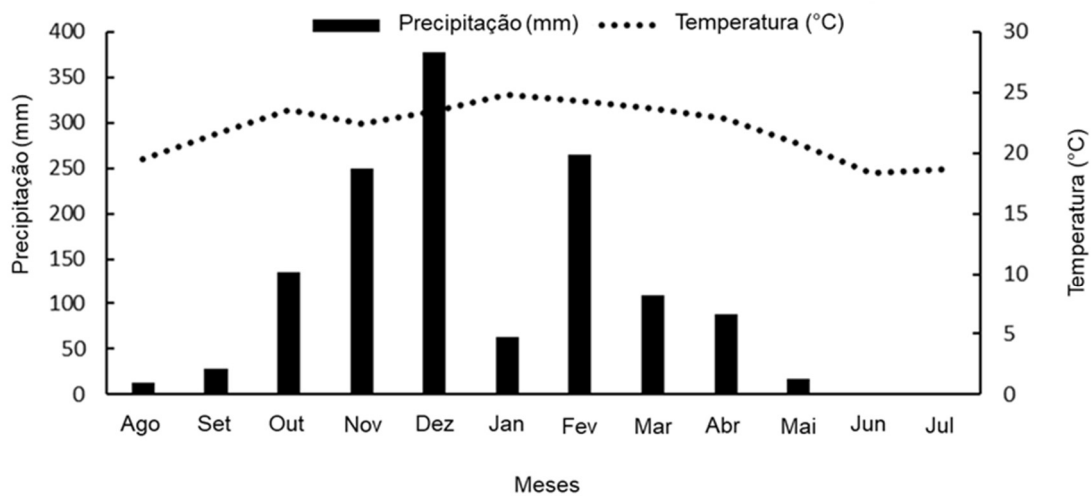
caulinita e gibbsita (Brito Galvão and Schulze, 1996) e textura muito argilosa, constituído por 190, 120 e 690 g kg⁻¹ de areia, silte e argila respectivamente.

Figura 1. O bioma Cerrado e o estado de Minas Gerais destacados no território brasileiro (A), município de Sete Lagoas na região central de Minas Gerais (B) e área experimental (C).



Legenda: SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária, BS = solo descoberto, e HI = alto investimento em fertilizantes.

Figura 2. Precipitação mensal acumulada e temperatura média para o período de agosto de 2018 a julho de 2019 no município de Sete Lagoas, Minas Gerais.



O experimento foi instalado no mês de julho de 2014 em condições de sequeiro e com prévio preparo convencional do solo e está disposto em faixas paralelas de dimensões iguais totalizando uma área de 4,4 hectares. Anteriormente à implantação do experimento a área vinha sendo utilizada para produção de milho e soja em sistema convencional de preparo do solo por mais de duas décadas. Foram realizadas operações de mobilização do solo com escarificador a 25 cm de profundidade, de modo a romper camadas compactadas. Realizou-se aplicações de calcário na dose de 4 t ha⁻¹ parceladas em duas operações, sendo a primeira incorporada com arado de aiveca e a segunda utilizando grade aradora. Também foi realizada aplicação de gesso agrícola na dose de 3 t ha⁻¹. Após dessecação da área adotou-se o sistema de plantio direto (NT).

2.2 Sistemas de manejo do solo

Foram avaliados 6 tratamentos (Figura 1C), os quais se diferem pelo manejo, todos em plantio direto (NT). Foram testados diferentes sistemas da rotação de culturas e investimento em fertilidade do solo como forma de melhorar a produção de palhada do NT, melhoria da qualidade física do solo e aumento de produtividade da área.

Na Tabela 1 estão descritos os tratamentos no decorrer dos anos desde a implantação do experimento. Monocultivos de soja (SS) e milho (MM) foram comparados às práticas de rotação de culturas (MS e MBSB). Adicionalmente, foram avaliados diferentes níveis de

investimento em fertilizantes nos sistemas de rotação, sendo tratamentos de médio investimento contrastados com tratamentos de alto investimento (HI).

Tabela 1. Manejo do solo em cada ano agrícola em um Latossolo Vermelho distrófico típico no município de Sete Lagoas-MG. As safras 2016/2017 e 2017/2018 configuram os mesmos tratamentos que 2014/2015 e 2016/2017, respectivamente.

| Manejo do solo | Nível de investimento em fertilizantes | Safra | Safra | ... | Safra | Período entressafra |
|----------------|--|--------------------|--------------------|-----|--------------------|---------------------|
| | | 2014/2015 Verão | 2015/2016 Verão | | 2018/2019 Verão | Outono-Primavera |
| SS | Médio | Soja | Soja | | Soja | Pousio |
| MM | Médio | Milho | Milho | | Milho | Pousio |
| MS | Médio | Milho | Soja | | Milho | Pousio |
| MBSB | Médio | Milho+braquiária | Soja+braquiária | | Milho+braquiária | Braquiária |
| MBSB-HI | Alto | Soja+braquiária | Milho+Braquiária | | Soja+braquiária | Braquiária |
| MS-HI | Alto | Soja | Milho | | Soja | Pousio |

SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária e HI = alto investimento em fertilizantes.

Para a safra 2018/2019, principal objeto de estudo deste trabalho, foram semeadas as cultivares RK 5813 RR (soja) e AG 8088 Pro2 (milho) consistindo em 320.000 e 61.000 sementes por hectare, respectivamente. O milho foi semeado em espaçamento de 70 cm e a soja em espaçamento de 50 cm entre as linhas de cultivo. A adubação consistiu em suprir totalmente as demandas nutricionais das culturas, caracterizando o nível de médio de investimento, e para o alto investimento, além do suprimento total da demanda das plantas, adubação suplementar considerando a exportação na colheita. Os níveis de investimento em fertilizantes são fundamentados nas recomendações de Resende et al. (2016) para elevadas produtividades de grãos de milho e soja. Foram utilizados 148, 250, 250, 250, 415 e 415 kg ha⁻¹ de NPK 08-28-16 + 0,3% de boro e 2,1% de enxofre para os tratamentos SS, MM, MS, MBSB, MBSB-HI e MS-HI, respectivamente. Os resultados da análise química do solo antes do plantio dos tratamentos em 2018 estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização química e física de um Latossolo Vermelho distrófico típico no município de Sete Lagoas-MG para cada tratamento antes da semeadura da safra de 2018/2019 (continua).

| Manejo do solo | Profundidade (m) | | | | | |
|----------------------------------|------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| | 0 - 0,10 | | | | | |
| | SS | MM | MS | MBSB | MBSB-HI | MS-HI |
| pH (H ₂ O) | 5,94 | 5,61 | 5,72 | 5,62 | 6,02 | 6,39 |
| pH (CaCl ₂) | 5,39 | 4,96 | 5,06 | 5,02 | 5,42 | 5,86 |
| P (mg dm ⁻³) | 19,43 | 38,01 | 30,62 | 26,50 | 12,48 | 29,86 |
| K (mg dm ⁻³) | 180,02 | 183,05 | 190,35 | 192,12 | 206,56 | 212,24 |
| S (mg dm ⁻³) | 3,61 | 3,15 | 3,76 | 4,06 | 4,55 | 3,61 |
| Ca (cmolc dm ⁻³) | 4,26 | 3,22 | 3,97 | 3,61 | 3,74 | 4,26 |
| Mg (cmolc dm ⁻³) | 1,31 | 0,92 | 0,96 | 1,10 | 1,05 | 1,09 |
| B (mg dm ⁻³) | 0,43 | 0,40 | 0,62 | 0,49 | 0,59 | 0,61 |
| Cu (mg dm ⁻³) | 0,75 | 0,77 | 1,01 | 0,93 | 0,72 | 0,86 |
| Fe (mg dm ⁻³) | 25,01 | 28,25 | 29,16 | 28,80 | 24,15 | 23,02 |
| Mn (mg dm ⁻³) | 46,04 | 44,58 | 52,61 | 57,35 | 59,99 | 67,87 |
| Zn (mg dm ⁻³) | 22,72 | 79,52 | 27,96 | 26,21 | 14,04 | 24,80 |
| Al (cmolc dm ⁻³) | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 |
| H + Al (cmolc dm ⁻³) | 3,69 | 5,20 | 4,84 | 5,28 | 4,57 | 3,45 |
| CEC (cmolc dm ⁻³) | 9,73 | 9,82 | 10,28 | 10,48 | 9,91 | 9,35 |
| V (%) | 61,60 | 47,30 | 52,80 | 49,60 | 53,67 | 61,64 |
| m (%) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

| Manejo do solo | Profundidade (m) | | | | | |
|----------------------------------|------------------|--------|--------|--------|---------|--------|
| | 0,10 - 0,20 | | | | | |
| | SS | MM | MS | MBSB | MBSB-HI | MS-HI |
| pH (H ₂ O) | 5,68 | 5,57 | 5,47 | 5,44 | 5,57 | 5,89 |
| pH (CaCl ₂) | 5,11 | 4,98 | 4,83 | 4,82 | 4,95 | 5,33 |
| P (mg dm ⁻³) | 11,32 | 12,45 | 13,09 | 12,59 | 7,10 | 10,79 |
| K (mg dm ⁻³) | 120,10 | 106,78 | 155,69 | 170,10 | 138,30 | 153,52 |
| S (mg dm ⁻³) | 5,68 | 6,05 | 6,41 | 6,21 | 6,59 | 5,75 |
| Ca (cmolc dm ⁻³) | 3,97 | 4,06 | 4,32 | 3,99 | 3,74 | 5,08 |
| Mg (cmolc dm ⁻³) | 1,08 | 0,95 | 0,93 | 0,87 | 0,86 | 1,26 |
| B (mg dm ⁻³) | 0,38 | 0,44 | 0,50 | 0,69 | 0,71 | 0,64 |
| Cu (mg dm ⁻³) | 0,77 | 0,80 | 0,90 | 0,83 | 0,68 | 0,69 |
| Fe (mg dm ⁻³) | 30,01 | 33,01 | 37,09 | 30,81 | 25,39 | 21,92 |
| Mn (mg dm ⁻³) | 37,59 | 44,11 | 53,00 | 59,74 | 52,46 | 62,60 |
| Zn (mg dm ⁻³) | 8,81 | 27,01 | 10,18 | 11,78 | 6,63 | 11,62 |
| Al (cmolc dm ⁻³) | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 |
| H + Al (cmolc dm ⁻³) | 4,89 | 5,12 | 5,40 | 5,50 | 4,84 | 4,23 |

| | | | | | | |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CEC (cmolc dm ⁻³) | 10,25 | 10,39 | 11,04 | 10,82 | 9,79 | 10,97 |
| V (%) | 51,60 | 51,00 | 51,20 | 49,22 | 50,60 | 61,45 |
| m (%) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária e HI = alto investimento em fertilizantes.

2.3 Amostragem

Amostras com estrutura preservada foram coletadas em cilindros metálicos, em duas profundidades (0-0,05 e 0,15-0,20 m), por meio de amostrador tipo Uhland para avaliação da densidade do solo (Bd), porosidade total (Tp), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), capacidade de água disponível (PAWC), capacidade de aeração (AC) e capacidade de campo relativa (RFC). Amostras deformadas foram coletadas com auxílio de enxadão e trado holandês para avaliação da estabilidade de agregados em água (WSA) e carbono orgânico (OC) na profundidade de 0-0,20 m.

A unidade experimental para avaliação das perdas de solo e água foi constituída de parcelas de escoamento, as quais foram implantadas na área com 3 pseudorrepetições para cada tratamento, bem como um tratamento adicional com solo descoberto (BS), o qual foi mantido desprovido de culturas e/ou vegetação espontânea, conforme sugerido para parcela-padrão ou unitária (Wischmeier e Smith, 1978). O controle de plantas invasoras no tratamento BS foi realizado manualmente.

As parcelas foram delimitadas por chapas de aço galvanizado de 0,3 m de largura, as quais foram cravadas a 0,10 m de profundidade no solo com área de 1,0 m² (0,5 x 2,0 m), sendo a maior dimensão disposta no sentido do declive do terreno. Na parte inferior das parcelas foi adaptado um cano de PVC com 75 mm de diâmetro com redução para 50 mm, o qual direcionou volume de água e solo erodido para os recipientes coletores de 25 dm³ de volume, os quais foram instalados em trincheiras abertas abaixo das parcelas.

Após os eventos de chuva coletou-se amostras da enxurrada presente nos tanques coletores foram coletadas. A perda de solo para cada tratamento foi obtida pela quantificação dos sedimentos erodidos na parcela experimental, sendo expresso em perda total de solo (Mg ha⁻¹) e o escoamento superficial expresso em perda total de água (mm). A declividade de cada parcela foi medida separadamente e os resultados foram corrigidos para declividade padrão de 9%.

A taxa de cobertura do solo (CR) foi determinada por meio da coleta manual e integral dos resíduos vegetais nas parcelas de escoamento. A produtividade das culturas (Mg ha^{-1}) foi quantificada por meio de amostragens em 5 pontos na área experimental realizada com colhedora mecanizada de parcelas experimentais.

2.4 Análises laboratoriais

As amostras indeformadas foram submetidas aos potenciais matriciais de -4 e -6 kPa em Funis de Büchner (Grohmann, 1960; Oliveira, 1968) e -10 e -1500 kPa em Extrator de Richards (Klute, 1986). Os atributos T_p , M_a , M_i , B_d e PAWC foram determinados com base na metodologia descrita em Teixeira et al. (2017). As variáveis AC e RFC foram calculados conforme Reynolds et al. (2008) e referem-se, respectivamente, aos indicadores AC_B e RWC mencionados pelos autores. O carbono orgânico (OC) foi determinado pela conversão do teor de matéria orgânica determinado por análise química de rotina pelo fator de van Bemmelen.

Para a determinação da estabilidade de agregados em água (Dane e Topp, 2002) foram utilizados agregados de solo compreendidos entre peneiras com malhas de diâmetro de 8,0 e 4,75 mm, os quais foram separados em grupos de massa de agregados correspondente a 25 g de massa de solo seco para análise para cada repetição. As amostras foram submetidas a um pré-umedecimento e posteriormente submetidas a agitação vertical em água em jogo de peneiras com malhas de 2,0; 1,0; 0,5; 0,25 e 0,105 mm, conforme método de Yoder (1936) durante 15 minutos. Desta forma, se procedeu os cálculos para determinação do Diâmetro Médio Geométrico (GMD), Diâmetro Médio Ponderado (MWD) e Porcentagem de Agregados Estáveis (WSA).

O volume de água perdido por escoamento superficial foi quantificado integralmente e os sedimentos foram quantificados por meio da coleta de amostras do volume presente no tanque em recipientes de 250 mL, anteriormente homogeneizados. Em cada recipiente foram adicionadas 3 gotas de HCl a 50% de concentração de modo a possibilitar a floculação e decantação das partículas suspensas. O peso de sedimento foi quantificado após secagem por 48 h em estufa a 105 °C. Para análise de perda de nutrientes dissolvidos na água escoada a solução amostrada ficou em repouso para decantação do sedimento grosseiro e uma alíquota de 20 mL foi retirada para análise, após filtragem, de P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu e Mn pela técnica de espectrofotometria de emissão ótica em plasma induzido (ICP).

2.5 Análise estatística

Um bloco experimental foi utilizado, desta forma, adotou-se o delineamento inteiramente casualizado, conforme recomendado por Ferreira et al. (2012) e adotado por Cecagno et al. (2016) e Peixoto et al. (2019). Os atributos físicos do solo foram analisados utilizando modelos mistos lineares generalizados (GLMM) de modo a considerar a dependência da amostragem em um mesmo ponto para duas camadas do solo, exceto para MWD, GMD e WSA, os quais foram avaliados apenas em uma profundidade.

Após verificar heteroscedasticidade na distribuição de perda de água por escoamento superficial (WL), perda de solo (SL) e perda de nutrientes (ver dados suplementares), os dados foram analisados usando quadrados mínimos generalizados (GLS) de forma a permitir a estimativa da variância para cada tratamentos separadamente (Cleasby and Nakagawa, 2011; Silva Junior et al., 2017). A adoção do GLS foi fundamentada na proposta de Cleasby and Nakagawa (2011) bem como na carência de dados heteroscedásticos reportados na literatura, mencionada pelos mesmos autores. Todavia, trabalhos avaliando erosão do solo também já reportaram heteroscedasticidade dos dados em seus estudos (Dunaway et al., 1994; Polyakov et al., 2020). A abordagem utilizada fundamenta-se na sugestão que a heterogeneidade de variância não deve ser considerada apenas como um impedimento à realização da ANOVA, mas representa uma importante informação sobre o padrão de dados ambientais, bem como a transformação dos dados (e.g. log) pode acarretar perdas de informação (Cleasby and Nakagawa, 2011).

Ademais, foi realizada análise de componentes principais (PCA) em conjunto com um agrupamento de Cluster para discriminação dos grupos de indivíduos com base nas variáveis observadas. Para a matriz de correlação utilizou-se o método do Rank de Spearman, por ser um método o qual não se baseia no valor bruto das variáveis, e sim em variáveis ordinais, possibilitando uma análise da relação linear em dados que não apresentem homogeneidade de variância.

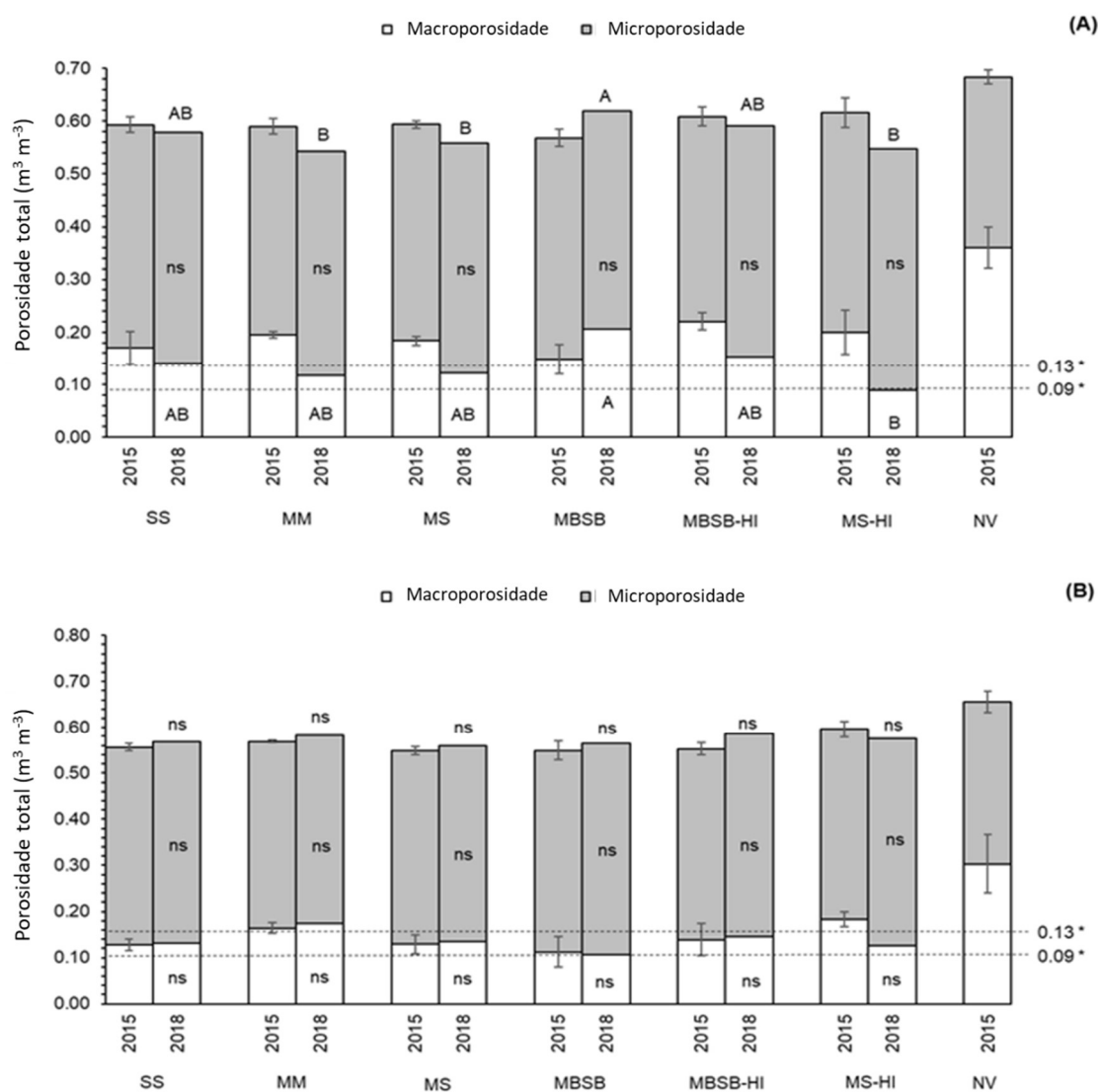
Realizou-se a ANOVA e as médias foram comparadas utilizando teste de Tukey a 5% de probabilidade. Os procedimentos estatísticos foram realizados utilizando software R 3.6.1 (R Development Core Team, 2019) e os pacotes tidyverse (Wickham, 2017), lmerTest (Kuznetsova et al., 2014), lsmeans (Lenth, 2016) e corrplot (Taiyun Wei, 2017).

3. Resultados

3.1 Qualidade física do solo

Os resultados dos atributos físicos do solo estão expressos na Figura 3, Tabela 3 e Tabela 4. Os sistemas de manejo apresentaram diferenças significativas apenas na camada superficial (0-0,05m). O tratamento MBSB apresentou a maior macroporosidade porém diferindo estatisticamente apenas de MS-HI, e maior porosidade total comparado a MM, MS e MS-HI. Todos os tratamentos apresentaram, desde a implantação do NT até o ano de avaliação, nas duas profundidades avaliadas, valores de Ma dentro do limite ótimo definido por Reynolds et al. (2008), com exceção de MS-HI, o qual apresentou valor próximo ao limite inferior.

Figura 3. Porosidade total, Microporosidade e Macroporosidade de um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG, para as camadas 0 – 0,05m (A) e 0,15 – 0,20m de profundidade (B) para cada tratamento no primeiro ano de semeadura direta (2015) e 2018. Barras de erro representam o erro padrão da média em 2015. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) em 2018, ns = não significativo.



Legenda: SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária, NV = Vegetação nativa de Cerrado e HI = alto investimento em fertilizantes.

Tabela 3. Densidade do solo (Bd), Capacidade de água disponível (PAWC), Capacidade de aeração (AC) e Capacidade de campo relativa (RFC) para cada tratamento em duas profundidades do solo. Médias seguidas por letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) em 2018, ns = não significativo (continua).

| Manejo do solo | Ano | Profundidade (m) | | | |
|----------------|------|-----------------------------|---|---|--------------------|
| | | 0 – 0,05 | | | |
| | | Bd (Mg m ⁻³) | PAWC (m ³ m ⁻³) | AC (m ³ m ⁻³) | RFC |
| SS | 2015 | 1,06 ± 0,04 | 0,13 ± 0,004 | 0,20 ± 0,03 | 0,66 ± 0,04 |
| MM | | 1,01 ± 0,02 | 0,12 ± 0,004 | 0,25 ± 0,01 | 0,63 ± 0,01 |
| MS | | 0,94 ± 0,02 | 0,14 ± 0,003 | 0,22 ± 0,01 | 0,64 ± 0,01 |
| MBSB | | 1,02 ± 0,04 | 0,13 ± 0,004 | 0,18 ± 0,03 | 0,69 ± 0,04 |
| MBSB-HI | | 0,96 ± 0,04 | 0,12 ± 0,006 | 0,24 ± 0,01 | 0,58 ± 0,02 |
| MS-HI | | 0,94 ± 0,07 | 0,15 ± 0,012 | 0,22 ± 0,04 | 0,61 ± 0,05 |
| SS | | 2018 | 1,06 ^{ns} | 0,09 ^{ns} | 0,18 AB |
| MM | 1,10 | | 0,11 | 0,13 AB | 0,76 AB |
| MS | 1,10 | | 0,10 | 0,15 AB | 0,73 AB |
| MBSB | 1,01 | | 0,11 | 0,24 A | 0,62 B |
| MBSB-HI | 1,07 | | 0,10 | 0,20 AB | 0,67 AB |
| MS-HI | 1,13 | | 0,13 | 0,11 B | 0,80 A |
| | | | | | |
| | | 0,15 – 0,20 | | | |
| | | Bd (Mg m ⁻³) | PAWC (m ³ m ⁻³) | AC (m ³ m ⁻³) | RFC |
| SS | 2015 | 1,11 ± 0,03 | 0,12 ± 0,004 | 0,16 ± 0,02 | 0,72 ± 0,03 |
| MM | | 1,04 ± 0,01 | 0,11 ± 0,002 | 0,19 ± 0,01 | 0,67 ± 0,01 |
| MS | | 1,05 ± 0,06 | 0,13 ± 0,007 | 0,16 ± 0,02 | 0,72 ± 0,03 |
| MBSB | | 1,06 ± 0,02 | 0,13 ± 0,012 | 0,15 ± 0,03 | 0,74 ± 0,05 |
| MBSB-HI | | 1,03 ± 0,01 | 0,13 ± 0,011 | 0,17 ± 0,03 | 0,70 ± 0,05 |
| MS-HI | | 0,96 ± 0,03 | 0,14 ± 0,007 | 0,23 ± 0,01 | 0,62 ± 0,02 |
| SS | | 2018 | 1,13 ^{ns} | 0,11 ^{ns} | 0,15 ^{ns} |
| MM | 1,04 | | 0,11 | 0,18 | 0,68 |
| MS | 1,12 | | 0,13 | 0,15 | 0,73 |
| MBSB | 1,12 | | 0,13 | 0,13 | 0,77 |
| MBSB-HI | 1,06 | | 0,12 | 0,17 | 0,71 |
| MS-HI | 1,11 | | 0,10 | 0,16 | 0,72 |

SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária, HI = alto investimento em fertilizantes.

A Bd e a PAWC não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos nas duas profundidades avaliadas (Tabela 3). Por outro lado, AC e RFC mostraram diferença estatística entre os sistemas de manejo para a camada superficial do solo (Tabela 3). O sistema MBSB apresentou maior AC e menor RFC comparado à MS-HI. Assim, a inclusão de braquiária no sistema de cultivo de grãos mostra benefícios quanto a aumento de poros maiores, e, portanto, favorecendo a aeração no solo, sem, contudo, alterar negativamente a retenção de água.

Os índices utilizados para inferir a estabilidade da agregação no solo (GMD, MWD e WSA) foram estatisticamente similares para todos os tratamentos. Também não ocorreu diferença entre os sistemas de manejo para o teor de carbono orgânico no solo na profundidade 0-20 cm (Tabela 4). Conseqüentemente, os indicadores de agregação assim como o teor de carbono orgânico podem não ter sido bons estratificadores do manejo ou o após 4 anos os sistemas propostos não atuam diretamente sobre a agregação do solo.

Tabela 4. Diâmetro médio geométrico (GMD), Diâmetro médio ponderado (MWD), Índice de estabilidade de agregados (WSA) e Carbono orgânico (OC) de um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG, para cada sistema de manejo do solo. Médias seguidas por letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) no ano de 2018, ns = não significativo.

| Manejo do solo | Ano | Profundidade (m) | | | |
|----------------|------|--------------------|--------------------|---------------------|-----------------------------|
| | | 0 – 0,20 | | | |
| | | GMD (mm) | MWD (mm) | WSA (%) | OC (g kg ⁻¹) |
| SS | 2018 | 4,55 ^{ns} | 4,83 ^{ns} | 95,50 ^{ns} | 15,60 ^{ns} |
| MM | | 4,18 | 4,62 | 94,80 | 16,80 |
| MS | | 4,65 | 4,86 | 96,90 | 15,90 |
| MBSB | | 4,31 | 4,70 | 95,20 | 14,70 |
| MBSB-HI | | 4,30 | 4,72 | 92,70 | 16,30 |
| MS-HI | | 4,39 | 4,73 | 96,00 | 16,10 |

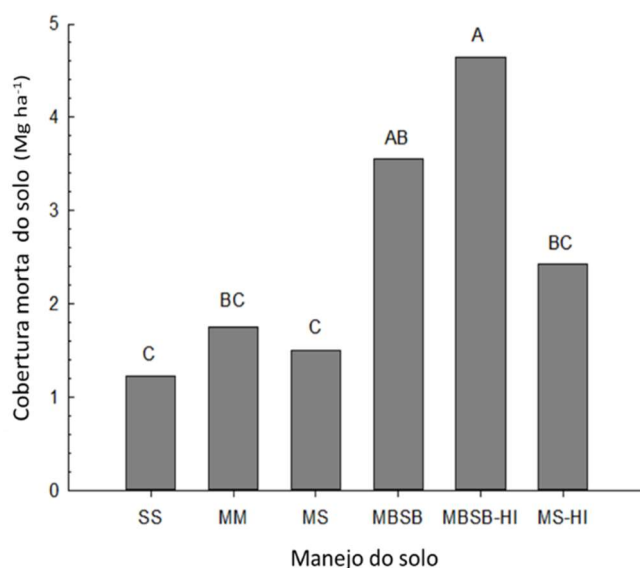
SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária, HI = alto investimento em fertilizantes.

3.2 Cobertura do solo e perdas de solo, água e nutrientes

A quantidade de resíduos vegetais que permaneceram sob o solo após colheita de milho e soja está expressa por meio da CR na Figura 4. Os sistemas SS e MS apresentaram as menores

CR comparadas aos sistemas que envolvem a rotação com braquiária (MBSB e MBSB-HI). O sistema MBSB-HI apresentou a maior CR comparado aos demais tratamentos, contudo não diferiu ($p < 0,05$) de MBSB. Esses resultados indicam que o uso da braquiária semeada em consórcio com a cultura principal propicia aumento da cobertura vegetal, sobretudo quando associada a alto investimento em fertilidade, o que pode contribuir para redução do escoamento superficial e aumento da infiltração de água no solo.

Figura 4. Cobertura do solo para cada manejo do solo em um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG na safra 2018-2019. Médias seguidas por letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).



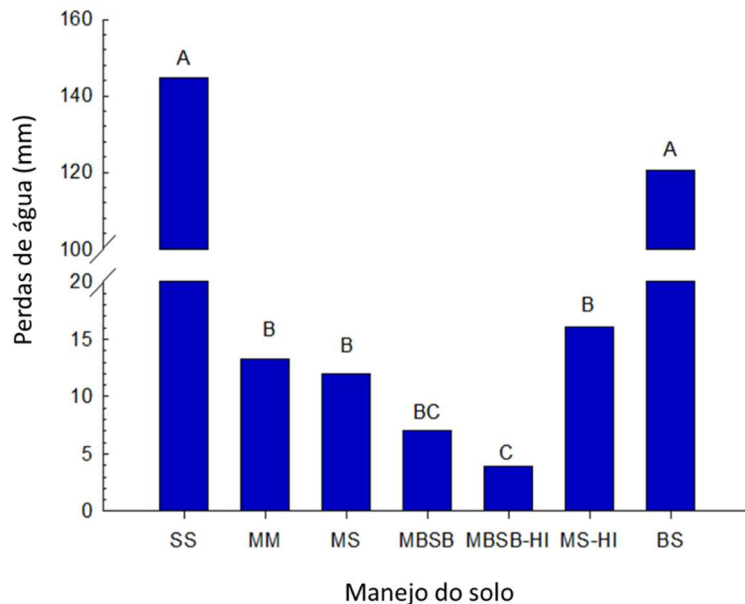
Legenda: SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária, HI = alto investimento em fertilizantes.

As perdas de solo, água e nutrientes estão apresentadas nas Figura 5, Figura 6 e Tabela 5, respectivamente. Observou-se, no geral, as maiores perdas de solo, água e nutrientes para o sistema de monocultivo de soja, com taxas de perda estatisticamente similares às da parcela de solo descoberto. Para SL os sistemas de manejo MBSB, MBSB-HI e MS-HI apresentaram as menores taxas, seguidos, em ordem crescente, por MS e MM. Já para WL, MBSB-HI apresentou a menor perda, diferindo de todos os sistemas exceto de MBSB. Esse resultado seguiu a mesma tendência dos resultados de cobertura do solo, confirmando a hipótese de que um aumento na cobertura vegetal promovido pela inclusão da braquiária no sistema de

produção de grãos atua no sentido de reduzir perdas de água o que pode impactar a produtividade. O nível de investimento não influenciou nos sistemas de rotação milho/soja em que não foi adotado o cultivo de braquiária, apresentando WL semelhante.

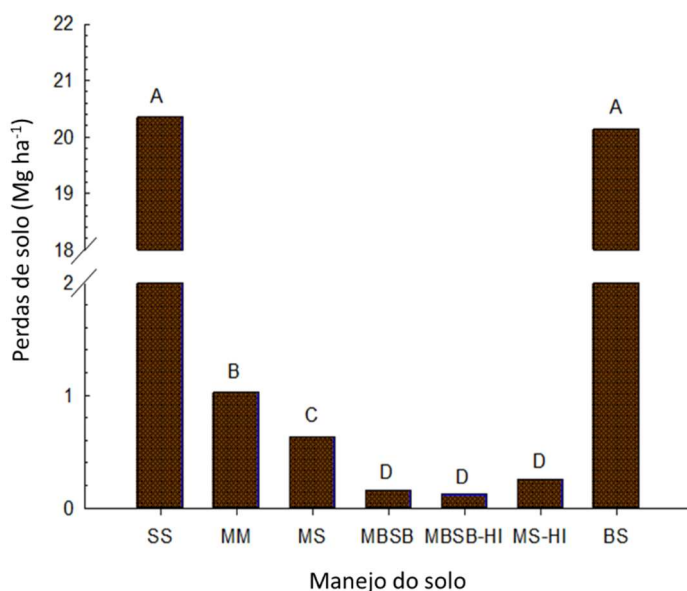
As perdas de nutrientes (Tabela 5), de forma geral, foram menores nos tratamentos os quais envolvem a rotação com braquiária (MBSB e MBSB-HI), seguidos pelos tratamentos de rotação milho/soja e pelo monocultivo de milho. As maiores perdas na água de escoamento superficial, nos sedimentos e totais, expressas em kg ha^{-1} , foram observadas para K, Ca, Mg e Fe nos tratamentos SS e BS. O K apresentou maiores perdas na água da enxurrada comparado aos sedimentos, enquanto para Ca observou-se o inverso. Considerando as perdas totais de nutrientes, os elementos seguiram, de forma decrescente, esta ordem: Ca, Fe, K, Mg e P.

Figura 5. Perdas de água por escoamento superficial em função de cada manejo do solo em um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG na safra 2018/2019, considerando declividade = 9%, usando mínimos quadrados generalizados devido à heterocedasticidade. Médias seguidas por letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).



Legenda: SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária, HI = alto investimento em fertilizantes, BS = solo descoberto.

Figura 6. Perdas de solo por erosão hídrica em função de cada manejo do solo em um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG na safra 2018/2019, considerando declividade = 9%, usando mínimos quadrados generalizados devido à heterocedasticidade. Médias seguidas por letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).



Legenda: SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária, HI = alto investimento em fertilizantes, BS = solo descoberto.

Tabela 5. Perdas de nutrientes por escoamento superficial, erosão hídrica e total perdido em função de cada manejo do solo em um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG na safra 2018/2019, considerando declividade = 9%, usando mínimos quadrados generalizados devido à heterocedasticidade. Médias seguidas por letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) (continua).

| Manejo do solo | K | P | Ca | Mg | S | Zn | Fe | Cu | Mn |
|--|---------|-----------|---------|----------|-----------|---------------------|----------|-----------|----------|
| Nutrientes na água de escoamento superficial | | | | | | | | | |
| SS | 4,076 A | 0,372 A | 3,641 B | 1,252 B | 0,372 ABC | 0,039 ^{ns} | 9,852 A | 0,004 AB | 0,084 B |
| MM | 0,123 C | 0,022 BCD | 0,171 D | 0,060 DE | 0,003 C | 0,002 | 0,855 BC | 0,001 B | 0,004 CD |
| MS | 0,147 C | 0,026 C | 0,167 D | 0,065 D | 0,017 C | 0,003 | 0,856 B | < 0,001 B | 0,003 CD |
| MBSB | 0,171 C | 0,013 CD | 0,157 D | 0,051 DE | 0,028 C | 0,002 | 0,240 BC | < 0,001 B | 0,003 CD |
| MBSB-HI | 0,096 C | 0,012 D | 0,109 D | 0,031 E | 0,024 C | 0,001 | 0,070 C | < 0,001 B | 0,001 D |
| MS-HI | 0,997 B | 0,064 B | 0,634 C | 0,235 C | 0,148 B | 0,002 | 0,480 B | < 0,001 B | 0,008 C |
| BS | 4,827 A | 0,591 A | 7,334 A | 2,515 A | 0,362 A | 0,033 | 12,378 A | 0,012 A | 0,181 A |

Nutrientes nos sedimentos

| | | | | | | | | | |
|---------|----------|----------|----------|---------|----------|---------|----------|-----------|----------|
| SS | 3,081 A | 0,306 B | 19,934 A | 3,374 A | 0,122 A | 1,231 A | 0,985 A | 0,009 ABC | 0,784 A |
| MM | 0,107 B | 0,041 CD | 0,906 B | 0,146 B | 0,005 B | 0,076 B | 0,049 B | 0,001 B | 0,054 B |
| MS | 0,091 BC | 0,034 C | 0,706 B | 0,140 B | 0,005 B | 0,125 B | 0,029 BC | 0,001 B | 0,061 B |
| MBSB | 0,027 CD | 0,002 D | 0,138 C | 0,024 C | 0,001 C | 0,006 C | 0,007 D | < 0,001 C | 0,008 C |
| MBSB-HI | 0,016 D | 0,002 D | 0,119 C | 0,021 C | 0,001 C | 0,005 C | 0,005 D | < 0,001 C | 0,008 C |
| MS-HI | 0,089 BC | 0,003 D | 0,243 C | 0,034 C | 0,004 BC | 0,010 C | 0,012 CD | < 0,001 C | 0,011 C |
| BS | 2,212 A | 0,941 A | 22,706 A | 3,948 A | 0,108 A | 2,723 A | 1,222 A | 0,012 A | 1,419 AB |

Nutrientes totais

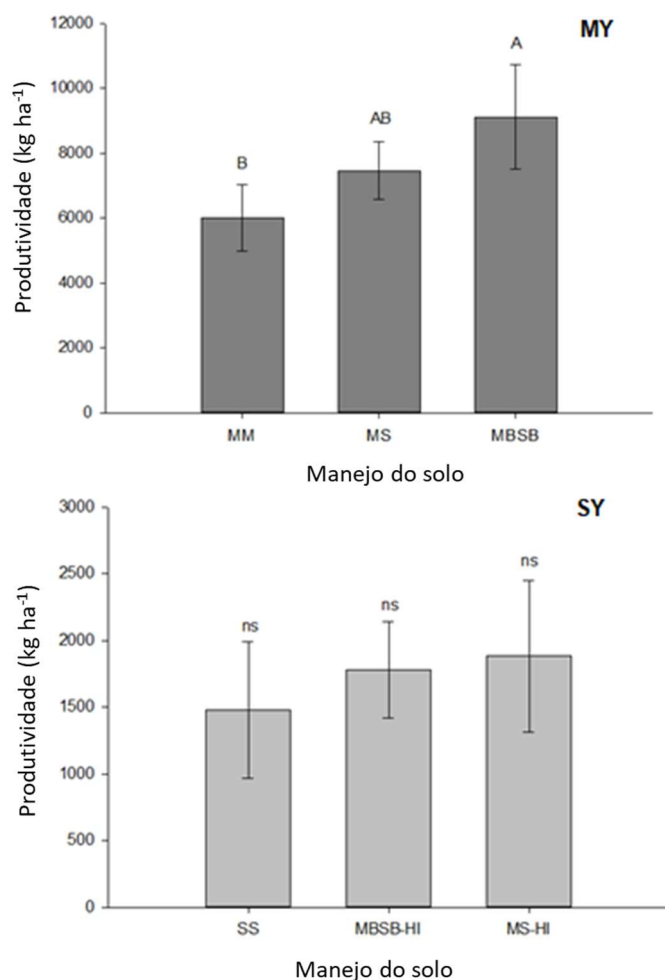
| | | | | | | | | | |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|-----------|---------|
| SS | 7,158 A | 0,839 A | 23,574 A | 4,625 A | 0,494 AB | 1,270 A | 10,837 A | 0,013 AB | 0,868 A |
| MM | 0,231 CD | 0,063 BC | 1,077 B | 0,207 BC | 0,008 C | 0,078 B | 0,904 BC | 0,001 B | 0,057 B |
| MS | 0,238 C | 0,059 B | 0,873 B | 0,205 BC | 0,022 C | 0,128 B | 0,885 B | < 0,001 B | 0,063 B |
| MBSB | 0,198 CD | 0,015 CD | 0,295 C | 0,075 CD | 0,029 C | 0,008 C | 0,247 BC | < 0,001 B | 0,010 C |
| MBSB-HI | 0,112 D | 0,014 D | 0,228 C | 0,052 D | 0,025 C | 0,006 C | 0,076 C | < 0,001 B | 0,009 C |
| MS-HI | 1,085 B | 0,067 B | 0,877 B | 0,269 B | 0,152 B | 0,012 C | 0,492 B | < 0,001 B | 0,019 C |
| BS | 7,039 A | 1,351 A | 30,041 A | 6,423 A | 0,470 A | 2,764 A | 13,601 A | 0,023 A | 1,599 A |

SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária, HI = alto investimento em fertilizantes, BS = solo descoberto.

3.3 Produtividade das culturas

As produtividades de milho (MY) e soja (SY) para o ano de 2018 estão apresentadas na Figura 7. Avaliando a cultura do milho, o sistema de rotação MBSB apresentou a maior produção de grãos comparada a MM. Os tratamentos nos quais foi semeada a cultura da soja não apresentaram diferenças significativas. As barras de erro nas figuras representam o desvio padrão, e, para os tratamentos com cultivo de soja em 2018, observou-se alta variabilidade amostral.

Figura 7. Produtividade de milho (MY) e soja (SY) em função de cada manejo do solo em um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG na safra 2018/2019. Barras de erro representam o desvio padrão da média. Médias seguidas por letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), ns = não significativo.



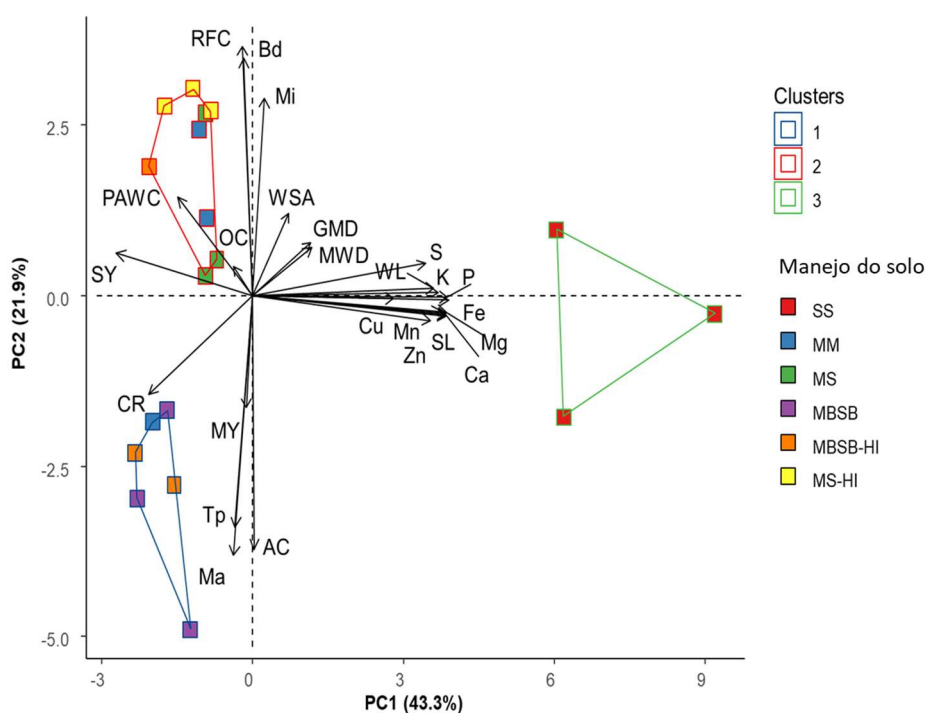
Legenda: SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária, HI = alto investimento em fertilizantes.

A análise de componentes principais (PCA) em conjunto com o agrupamento de Cluster para variáveis avaliadas na camada superficial do solo está apresentada na Figura 8 e a matriz de correlação de Spearman, para as mesmas variáveis, na Figura 9. Estas análises foram realizadas apenas para a camada superficial do solo. Os resultados da PCA promoveram a distinção de três principais grupos de sistemas de manejo: (1) SS separado dos demais tratamentos; (2) MM e sistemas de rotação milho/soja; e (3) sistemas de rotação com inclusão de braquiária. Observou-se a forte influência de SS nas perdas de solo, água e nutrientes (Figura 8), e tais perdas negativamente correlacionadas com a produtividade da cultura da soja (Figura

9). Sistemas de rotação com braquiária (MBSB e MBSB-HI) apresentaram relação com o aumento de CR, Tp, Ma e AC, bem como demonstraram relação negativa, ou seja, menores valores de Bd e RFC (Figura 8). Nesse sentido, pela PCA observa-se que a relação entre atributos e produtividade difere em função da cultura; com atributos relacionados a disponibilidade de ar influenciando positivamente e mais para o milho, enquanto atributos relacionados a disponibilidade de água influem mais a produtividade da soja.

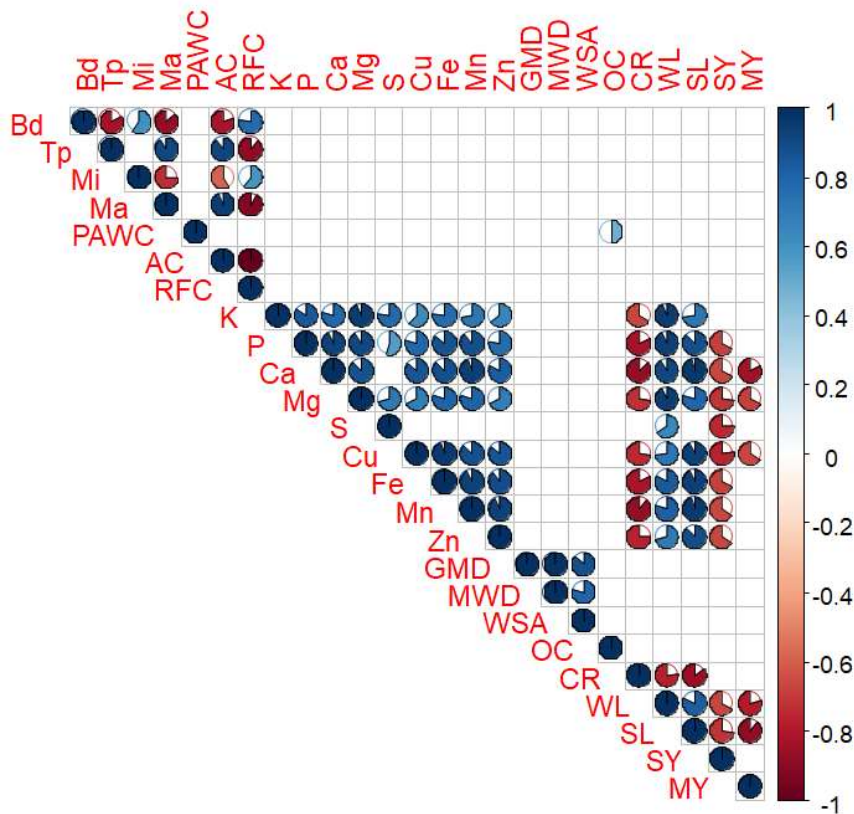
As correlações obtidas demonstraram, principalmente, a forte influência de CR nos processos de perdas de água e solo por erosão hídrica. A Figura 9 apresenta as correlações negativas entre CR e WL, SL e perda de nutrientes. A produtividade das culturas também apresentou correlação negativa com WL, SL e perda de nutrientes, mostrando assim relação entre o aumento da degradação ambiental e a redução da eficiência agrônômica. O teor de carbono orgânico (OC) do solo apresentou correlação positiva com a capacidade do solo em disponibilizar água para as plantas (Figura 9), entretanto, não houve diferenças significativas para estas duas variáveis, entre os sistemas de manejo (Tabela 2 e Tabela 3). Os indicadores da estabilidade de agregação assim como os demais atributos físicos do solo não correlacionaram com as perdas de água, solo e nutrientes, nem com a produtividade das culturas.

Figura 8. Análise de Componentes Principais (PCA) com agrupamento de indivíduos por análise de Cluster para a camada superficial (0-0,05 m) de um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG na safra 2018/2019.



Legenda: RFC = Capacidade de campo relativa, Bd = Densidade do solo, Mi = Microporosidade, WSA = Índice de estabilidade de agregados, GMD = Diâmetro médio geométrico, MWD = Diâmetro médio ponderado, WL = Perdas de água, SL = Perdas de solo, AC = Capacidade de aeração, Ma = Macroporosidade, Tp = Porosidade total, MY = Produtividade de milho, SY = Produtividade de soja, CR = Taxa de cobertura do solo, PAWC = Capacidade de água disponível, OC = Carbono orgânico, SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária, HI = alto investimento em fertilizantes.

Figura 9. Matriz de correlação de Spearman para a camada superficial (0-0,05 m) de um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG na safra 2018/2019. Apenas correlações significativas ($p < 0,05$) são apresentadas.



Legenda: RFC = Capacidade de campo relativa, Bd = Densidade do solo, Mi = Microporosidade, WSA = Índice de estabilidade de agregados, GMD = Diâmetro médio geométrico, MWD = Diâmetro médio ponderado, WL = Perdas de água, SL = Perdas de solo, AC = Capacidade de aeração, Ma = Macroporosidade, Tp = Porosidade total, MY = Produtividade de milho, SY = Produtividade de soja, CR = Taxa de cobertura do solo, PAWC = Capacidade de água disponível, OC = Carbono orgânico, SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária, HI = alto investimento em fertilizantes.

4. Discussão

Considerando as operações empregadas no NT, houve mobilização anual do solo apenas na semeadura e adubação inicial das culturas, operação a qual ocorreu até 7 cm de profundidade. Como as operações mecanizadas em todos os tratamentos foram equivalentes, as diferenças obtidas nos resultados permitem a avaliação do efeito das culturas utilizadas em cada sistema, sobretudo no que se refere ao desenvolvimento radicular.

4.1 *Qualidade física do solo*

Para a qualidade estrutural, os atributos físicos utilizados para inferir a porosidade mostraram diferenças entre os sistemas de manejo principalmente na camada superficial (Figura 3, Tabela 3), o que provavelmente é explicado pelos efeitos iniciais após a adoção do NT, como o acúmulo de resíduos vegetais na superfície e aumento da compactação comparado a sistemas em que há o revolvimento periódico, que concentram-se principalmente nos primeiros 10 cm de profundidade do solo (Blanco-Canqui and Ruis, 2018). No entanto, os indicadores estáticos derivados da porosidade utilizados não atingiram valores os quais são apontados como restritivos ao crescimento vegetal (Reynolds et al., 2008). Por outro lado, os sistemas de manejo os quais foram incluídos a braquiária (MBSB) aumentaram a Ma e AC, bem como reduzir a RFC encontrados para o sistema MBSB em comparação a MS-HI na camada superficial é atribuído à presença da braquiária na rotação e aos efeitos do vigoroso sistema radicular da forrageira na qualidade física do solo (Anghinoni et al., 2019; Moreira et al., 2016). O mecanismo para esse aumento é a renovação do sistema radicular a cada cultivo e seu próprio crescimento no solo formando poros (bioporos) que normalmente são de tamanho que os classificam como macroporos, persistindo ao longo do tempo (Betoli Júnior et al., 2012; Calonego et al., 2017)

As diferenças na qualidade física do solo obtidas entre os sistemas de rotação e sucessão foram sutis, uma vez que as alterações físicas em Latossolos sob sistema plantio direto são expressadas de acordo com o aumento do tempo de adoção do sistema (Moraes et al., 2016) contudo, os resultados corroboram a hipótese de que sistemas com maior diversificação de culturas contribuem para a melhoria ou manutenção da qualidade estrutural do solo (Anghinoni et al., 2019; Kassam et al., 2018). Entretanto, não foram obtidas diferenças na estabilidade de agregados tampouco no conteúdo de carbono orgânico do solo (Tabela 4), o que pode ser explicado pelo relativo curto período de adoção do NT corroborando com trabalhos que concluem que o desempenho de sistemas NT está associado ao período de adoção, apresentando

incremento com o tempo (Moraes et al., 2016; Reichert et al., 2016). Ademais é extremamente dependente do contexto no qual está inserido (Pittelkow et al., 2015), como no caso do presente estudo a condição climática tropical favorece a degradação rápida da matéria orgânica dificultando sua incorporação ao solo (Six et al., 2002). Nesse sentido, os sistemas propostos podem ainda não ter uma diversificação de espécies que promoveu condições biológicas no solo para incrementar o teor de OC e a estabilidade da agregação, apesar dos valores desses atributos já se encontrarem em níveis os quais não indicam degradação do solo (Reynolds et al., 2008). Por outro lado, diferindo de resultados obtidos por Anghinoni et al. (2019), trabalho no qual os autores também avaliaram sistemas de produção na região do Cerrado, porém em região que apresenta regime de chuvas melhor distribuído, o que possibilita mais de um cultivo por ano, dessa forma, produzindo mais biomassa e favorecendo o incremento de matéria orgânica no solo.

A qualidade física dos sistemas estudados, no geral, apresentam-se em boas condições, o que pode ser confirmado com valores de macroporosidade e densidade do solo majoritariamente dentro dos limites estabelecidos, respectivamente, por Reynolds et al. (2008) e Severiano et al. (2011). Tal fato é devido, possivelmente, à natureza dos Latossolos com estrutura granular, os quais intrinsecamente não apresentam restrições físicas ao desenvolvimento de plantas a exceção da baixa capacidade de disponibilizar água (Ferreira et al., 1999; Silva et al., 2015), desta forma, infere-se que, para a região e o solo estudado, o período de quatro anos de adoção do NT não foi suficientemente sensível para detectar grandes diferenças entre as práticas utilizadas, tanto no que se refere à degradação bem como à melhoria da qualidade física do solo. Todavia, observou-se melhoria no que se refere à aeração do solo, observada para a maior AC e Ma em MBSB comparado a MS-HI, explicado pela inclusão de forrageiras, como a braquiária, nos sistemas de rotação, as quais podem promover uma série de benefícios físicos, a exemplo a formação de bioporos devido à atuação do vigoroso sistema radicular (Betioli Júnior et al., 2012; Calonego et al., 2017; Crusciol et al., 2014; Nascente et al., 2013; Pariz et al., 2017).

4.2 Cobertura do solo e perdas de solo, água e nutrientes

A maior taxa de cobertura do solo (Figura 4) constituiu fator chave no controle das perdas de água (Figura 5) e solo por erosão (Figura 6) nos sistemas de cultivo como reportado em outros trabalhos (Dechen et al. 2015; Deuschle et al., 2019; Merten et al., 2015; Zhang et al., 2015). A inclusão da braquiária foi importante em função da alta quantidade de biomassa

vegetal produzida e promoção de uma cobertura persistente (Crusciol et al., 2014; Nascente et al., 2013), devido à alta relação C/N no tecido vegetal, o que diminui a taxa de decomposição (Timossi et al., 2007) e contribui para a permanência da proteção da superfície do solo. A cobertura do solo por resíduos vegetais em NT intercepta a precipitação, impedindo o impacto direto da gota de chuva na superfície do solo, reduzindo o selamento superficial e mitigando o processo de escoamento e perda de solo por erosão (Blanco-Canqui and Ruis, 2018),.

As perdas de nutrientes (Tabela 5), tanto na água quanto nos sedimentos, foram mais expressivas para os elementos K, Ca e Mg. As perdas de K são explicadas pelo fato do elemento não ser componente estrutural de nenhuma molécula orgânica, sendo, portanto, facilmente lixiviado dos tecidos vegetais (Torres and Pereira, 2008). As perdas de Ca e Mg são atribuídas, principalmente, à prática de calagem no NT, a qual, por não haver mobilização do solo e consequente incorporação do insumo em profundidade, é realizada em superfície. Salienta-se que o K tem função reguladora de abertura e fechamento de estômatos nas plantas e suas perdas podem acarretar suprimento aquém da demanda vegetal, podendo ser prejudicial à produtividade das culturas, sobretudo em regiões que sofrem com a escassez hídrica, como a do presente estudo.

Os sistemas de cultivo com a braquiária no sistema de rotação foram segregados dos demais pela análise de Cluster (Figura 8) e as maiores taxas de CR, Ma, Tp e AC são atribuídos à grande produção de biomassa e o agressivo sistema radicular da forrageira (Crusciol et al., 2014), fatores os quais influenciaram diretamente as menores taxas de WL e SL (Figura 9). O monocultivo de soja (SS) também apresentou distinção dos demais sistemas de manejo, responsável principalmente por maiores taxas de WL, SL e perdas de nutrientes. Esses resultados apresentaram a vulnerabilidade do cultivo sucessivo de soja ao processo erosivo, com perdas similares estatisticamente às das parcelas de solo descoberto. O cultivo sucessivo de soja promove uma palhada remanescente de baixa relação C/N, o que favorece a decomposição acelerada e diminui a permanência dos resíduos na superfície do solo.

As perdas de nutrientes dos campos de cultivo podem constituir sério prejuízo aos produtores. Particularmente no caso do K, o nutriente mais perdido na área de estudo, destaca-se que o Brasil depende basicamente da importação para suprimento interno de fertilizantes potássicos, sendo um dos maiores importadores de KCl do mundo (Mancuso et al., 2014; Santos et al., 2015). No que se refere ao fósforo, suas perdas devem ser rigorosamente controladas em virtude do país apresentar, em geral, solos ácidos, com baixa disponibilidade e alta capacidade de fixação do elemento (Fageria and Baligar, 2001). Considerando as perdas apresentadas na Tabela 5, o monocultivo de soja demandaria uma reposição de $\sim 53 \text{ kg ha}^{-1}$ do fertilizante

utilizado (NPK 08-28-16) para suprir as perdas de potássio por erosão e escoamento superficial, que significa mais de 35% da adubação que foi realizada para esse tratamento.

4.3 Produtividade das culturas

A produtividade da cultura da soja foi extremamente baixa comparada à média de produtividade do estado de Minas Gerais ($\sim 3000 \text{ kg ha}^{-1}$) (Conab, 2019). As análises também apresentaram alta variabilidade amostral (Figura 7), desta forma, os resultados obtidos não foram suficientemente sensíveis para detectar possíveis diferenças de produção entre os sistemas de manejo. Esse resultado é explicado pelo período de estiagem de mais de 30 dias observado na região, do início de janeiro a fevereiro (Figura 2), em plena fase de formação e enchimento dos grãos da cultura. Ademais, além do déficit de suprimento hídrico da própria cultura, o período de seca explica a ausência de efeito do maior nível de investimento em fertilizantes, possivelmente reduzindo a eficiência dos mecanismos de transporte de nutrientes e absorção pelas raízes das plantas. Portanto, considerando a “Lei de Liebig” o rendimento da cultura da soja foi limitado pela escassez hídrica, independentemente de outros fatores como investimento em fertilizantes, qualidade física do solo e taxas de erosão, escoamento superficial e perdas de nutrientes.

Com base nos resultados de produtividade, a cultura da soja apresentou-se mais vulnerável que o milho ao período de seca registrado na região. Independente do sistema de manejo adotado, tratamentos nos quais foi semeada a cultura do milho no ano de 2018 apresentaram produtividades semelhantes ou acima da média do ano registrada para o estado de Minas Gerais ($\sim 6000 \text{ kg ha}^{-1}$) (Conab, 2019). A maior suscetibilidade ao déficit hídrico da cultura da soja em relação a cultura do milho é atribuída ao menor aprofundamento radicular (Gao et al., 2010), resultado em menor capacidade de uso da água no perfil do solo.

A intensificação do sistema no tratamento MBSB, o qual em 2018 esteve sob cultivo de milho, mostrou-se benéfica, aumentando a produtividade da cultura, melhorando a estrutura do solo, aumentando a taxa de cobertura e reduzindo as perdas de solo, água e nutrientes. As vantagens do sistema mais diversificado foram consideráveis e permitem a inferência que o as rotações não só melhoraram as condições de cultivo bem como aumentaram a produtividade da cultura, evidenciando a maior influência dos benefícios da diversificação do sistema em detrimento da possível competição do milho e da braquiária, visto que foram semeadas simultaneamente. Esses resultados contribuem com outros benefícios do consórcio milho-braquiária já reportados na literatura (Borghetti et al., 2012; Garcia et al., 2008) e assim destacam

o potencial para adoção desses sistemas intensificados logo nos quatro primeiros anos de adoção sobretudo em regiões com intenso déficit hídrico.

As correlações entre WL, SL e perdas de nutrientes com a produtividade das culturas evidenciou os efeitos nocivos do processo erosivo no desempenho dos cultivos (Blanco-Canqui and Lal, 2008). De forma geral, a taxa de cobertura do solo foi o principal fator regulador dos processos de escoamento superficial, erosão e perdas de nutrientes nas condições estudadas (Figura 8). Os resultados alertam para a necessidade da diversificação dos cultivos (intensificação ecológica) e produção de cobertura adequada no NT, de modo a promover a conservação do solo, da água, reduzir impactos ambientais e aumentar a produtividade e consequente rentabilidade dos cultivos.

5. Conclusões

As diferenças na qualidade física do solo obtidas entre os sistemas de rotação e sucessão foram sutis, uma vez que as alterações físicas em Latossolos sob sistema plantio direto são expressadas de acordo com o aumento do tempo de adoção do sistema, contudo, os resultados corroboram nossa hipótese de que sistemas com maior diversificação de culturas contribuem para a melhoria ou manutenção da qualidade estrutural do solo. MBSB apresentou maior capacidade de aeração comparado a MS-HI na camada superficial do solo, resultado atribuído à inclusão da braquiária no sistema e seu agressivo sistema radicular. De forma geral, a qualidade física dos sistemas de manejo apresenta-se em boas condições, o que é condizente com a natureza pedológica do Latossolo de estrutura granular objeto deste trabalho. MBSB-HI apresentou a maior taxa de cobertura do solo, o que foi essencial para a redução das perdas de solo, água e nutrientes. SS apresentou vulnerabilidade semelhante ao solo descoberto no que se refere aos processos de perda de solo por erosão hídrica e água por escoamento superficial. A intensificação do sistema no tratamento MBSB, o qual em 2018 esteve sob cultivo de milho, mostrou-se benéfica, aumentando a produtividade da cultura, melhorando a estrutura do solo, aumentando a taxa de cobertura e reduzindo as perdas de solo, água e nutrientes. As correlações entre WL, SL e perdas de nutrientes com a produtividade das culturas evidenciou os efeitos nocivos do processo erosivo no desempenho dos cultivos. De forma geral, a taxa de cobertura do solo foi o principal fator regulador dos processos de escoamento superficial, erosão e perdas de nutrientes nas condições estudadas. Os resultados alertam para a necessidade da diversificação dos cultivos (intensificação ecológica) e produção de cobertura adequada no NT,

de modo a promover a conservação do solo, da água, reduzir impactos ambientais e aumentar a produtividade e consequente rentabilidade dos cultivos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a contribuição financeira da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) processos CAG - APQ-02075-16 e PPM-00774-18, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) processos 422538/2016-7 e 408204/2016-8, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras (DCS – UFLA). Os autores agradecem a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) pela colaboração na instalação e condução do experimento de campo. BMS agradece o CNPq pelo apoio financeiro.

Dados suplementares

Figura 10. Distribuição dos dados brutos de Perdas de solo (SL) de um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG, sugerindo heterocedasticidade.

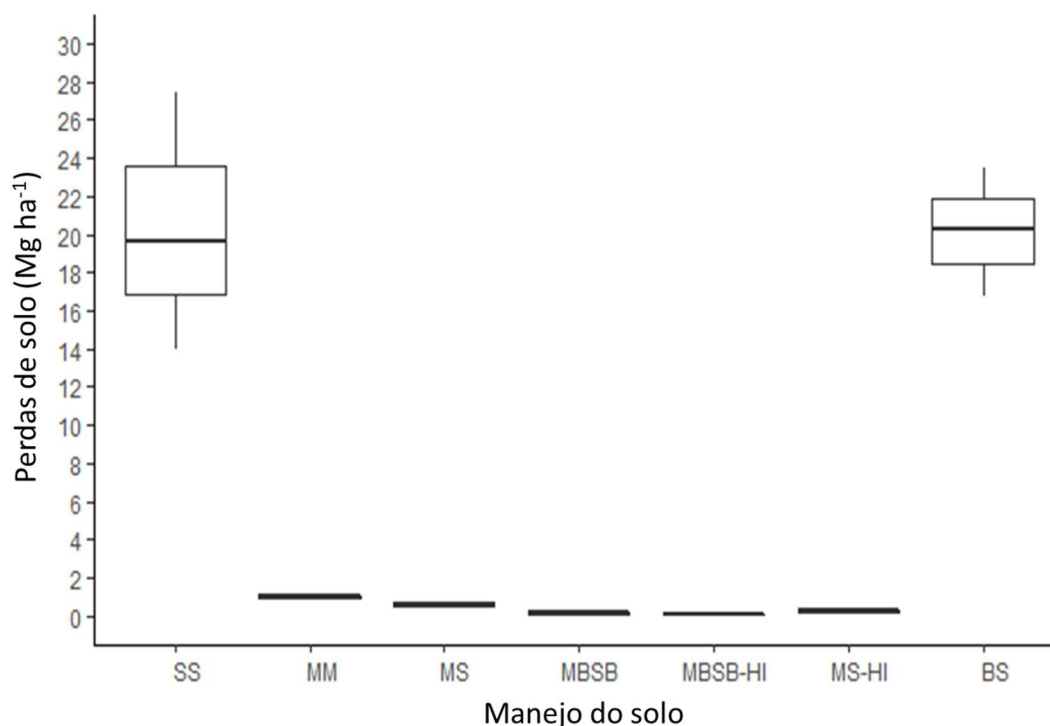


Figura 11. Distribuição dos dados brutos de Perdas de água (WL) de um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG, sugerindo heterocedasticidade.

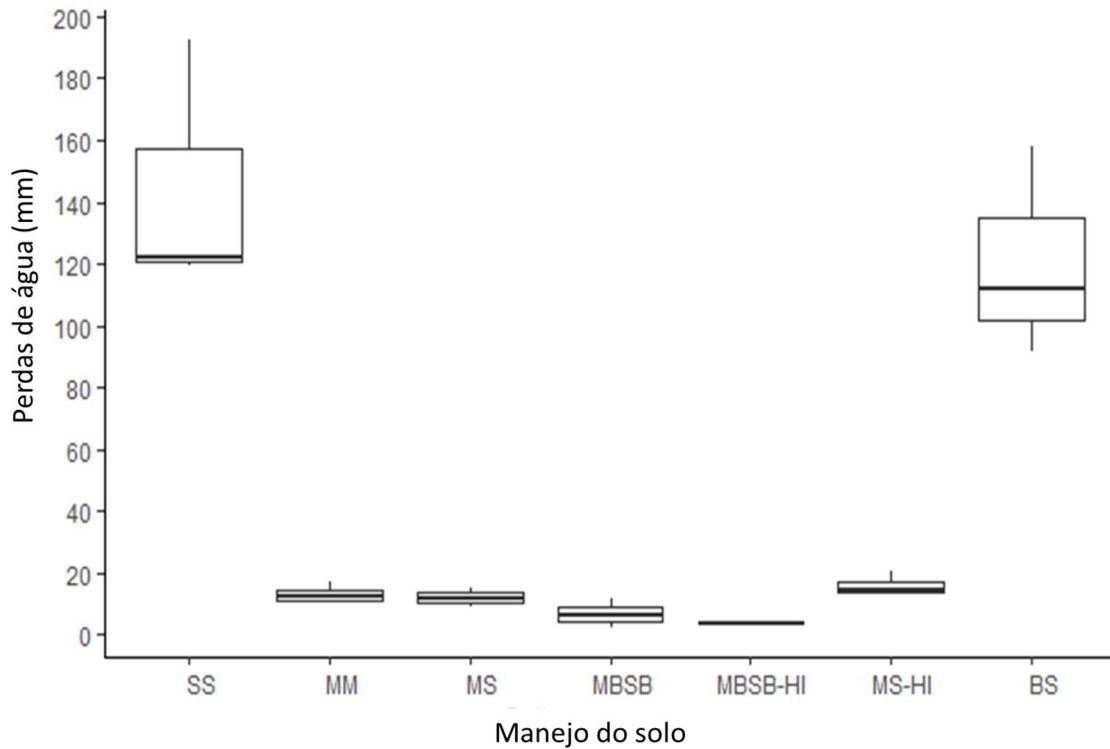
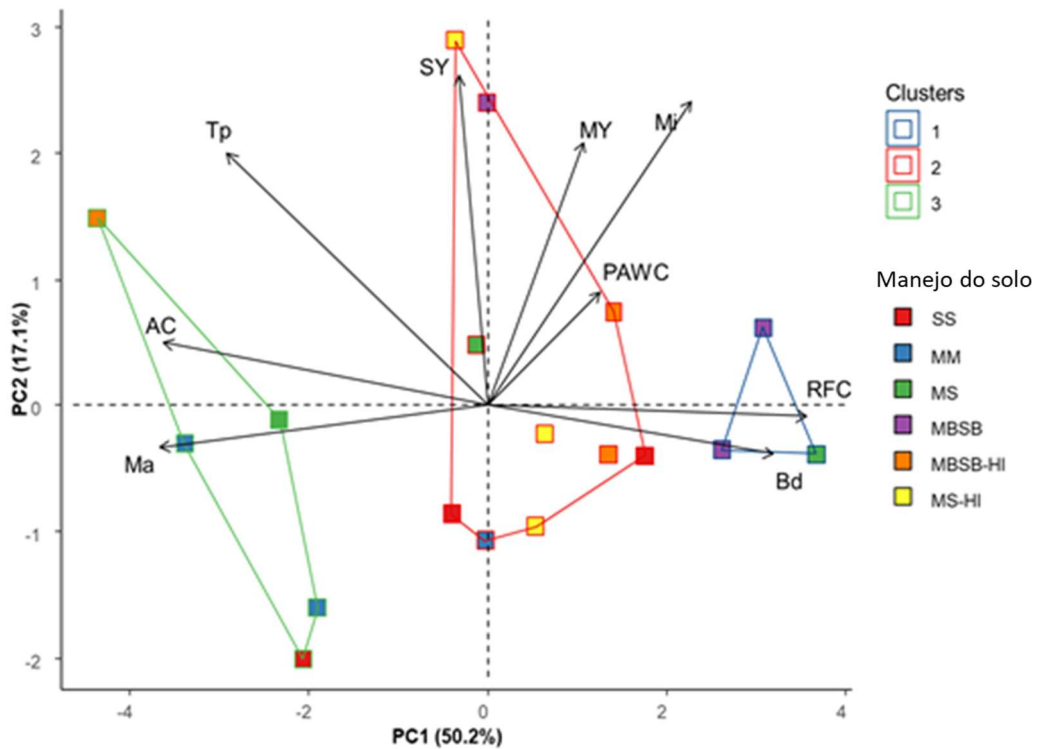
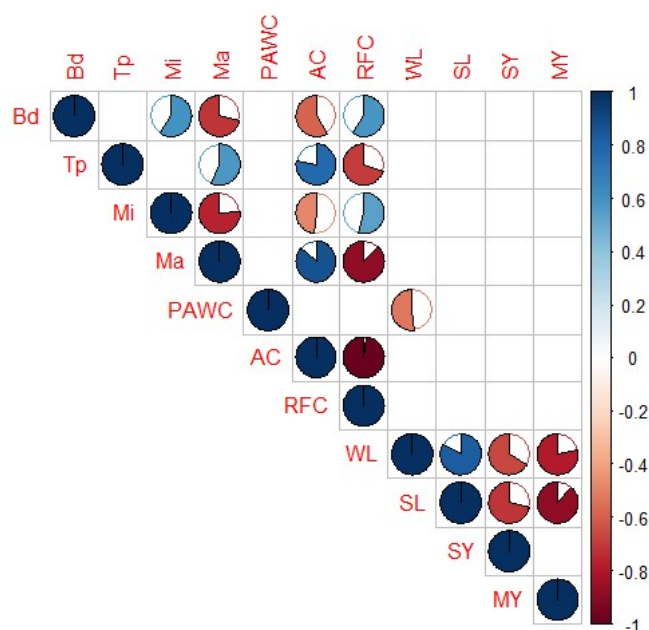


Figura 12. Análise de Componentes Principais (PCA) com agrupamento de indivíduos por análise de Cluster para a camada subsuperficial (0,15-0,20 m) de um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG na safra 2018/2019.



Legenda: RFC = Capacidade de campo relativa, Bd = Densidade do solo, Mi = Microporosidade, WSA = Índice de estabilidade de agregados, GMD = Diâmetro médio geométrico, MWD = Diâmetro médio ponderado, WL = Perdas de água, SL = Perdas de solo, AC = Capacidade de aeração, Ma = Macroporosidade, Tp = Porosidade total, MY = Produtividade de milho, SY = Produtividade de soja, CR = Taxa de cobertura do solo, PAWC = Capacidade de água disponível, OC = Carbono orgânico, SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária, HI = alto investimento em fertilizantes.

Figura 13. Matriz de correlação de Pearson para a camada superficial (0,15-0,20 m) de um Latossolo Vermelho distrófico em Sete Lagoas-MG na safra 2018/2019. Apenas correlações significativas ($p < 0,05$) são apresentadas.



Legenda: RFC = Capacidade de campo relativa, Bd = Densidade do solo, Mi = Microporosidade, WL = Perdas de água, SL = Perdas de solo, AC = Capacidade de aeração, Ma = Macroporosidade, Tp = Porosidade total, MY = Produtividade de milho, SY = Produtividade de soja, CR = Taxa de cobertura do solo, PAWC = Capacidade de água disponível, SS = monocultivo de soja, MM = monocultivo de milho, MS = rotação milho/soja, MBSB = rotação milho/braquiária/soja/braquiária, HI = alto investimento em fertilizantes.

Referências

Anghinoni, G., Tormena, C.A., Lal, R., Zancanaro, L., Kappes, C., 2019. Enhancing soil physical quality and cotton yields through diversification of agricultural practices in central Brazil. *Land Degradation and Development* 30, 788–798.

<https://doi.org/10.1002/ldr.3267>

- Asmamaw, D.K., 2017. A critical review of the water balance and agronomic effects of conservation tillage under rain-fed agriculture in Ethiopia. *Land Degradation and Development* 855, 843–855. <https://doi.org/10.1002/ldr.2587>
- Betioli Júnior, E., Moreira, W.H., Tormena, C.A., Ferreira, C.J.B., Silva, A.P., Giarola, N.F.B., 2012. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um latossolo vermelho após 30 anos sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 36, 971–982.
- Blanco-Canqui, H., Lal, R., 2008. *Principles of Soil Conservation and Management*.
- Blanco-Canqui, H., Ruis, S.J., 2018. No-tillage and soil physical environment. *Geoderma* 326, 164–200. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011>
- Blevins, R.L., Cook, D., Phillips, S.H., Phillips, R.E., 1971. Influence of No-tillage on Soil Moisture. *Agronomy Journal* 1–4.
- Borghi, E., Crusciol, C.A.C., 2007. Produtividade de milho , espaçamento e modalidade de consorciação com *Brachiaria brizantha* em sistema plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 42, 163–171.
- Borghi, É., Crusciol, C.A.C., Nascente, A.S., Mateus, G.P., Martins, P.O., Costa, C., 2012. Effects of row spacing and intercrop on maize grain yield and forage production of palisade grass. *Crop and Pasture Science* 63, 1106–1113. <https://doi.org/10.1071/CP12344>
- Borrelli, P., Robinson, D.A., Fleischer, L.R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schütt, B., Ferro, V., Bagarello, V., Oost, K. Van, Montanarella, L., Panagos, P., 2017. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications* 8, 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Brito Galvão, T.C., Schulze, D.G., 1996. Mineralogical Properties of a Collapsible Lateritic Soil from Minas Gerais, Brazil. *Soil Science Society of America Journal* 60, 1969–1978.
- Calonego, J.C., Borghi, E., Crusciol, C.A.C., 2011. Intervalo hídrico ótimo e compactação do solo com cultivo consorciado de milho e Braquiária. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 35, 2183–2190. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600033>

- Calonego, J.C., Raphael, J.P.A., Rigon, J.P.G., Oliveira Neto, L. de, Rosolem, C.A., 2017. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. *European Journal of Agronomy* 85, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.02.001>
- Carducci, C.E., Oliveira, G.C. De, Zeviani, W.M., Lima, V.M.P., Serafim, M.E., 2013. BIMODAL PORE DISTRIBUTION ON SOILS UNDER CONSERVATION MANAGEMENT SYSTEM FOR COFFEE CROP. *Engenharia Agrícola* 33, 291–302. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162013000200008>.
- Castro, G.S.A., Crusciol, C.A.C., 2013. Geoderma Effects of super fi cial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation. *Geoderma* 195–196, 234–242. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.12.006>
- Cecagno, D., de Andrade Costa, S.E.V.G., Anghinoni, I., Kunrath, T.R., Martins, A.P., Reichert, J.M., Gubiani, P.I., Balerini, F., Fink, J.R., de Faccio Carvalho, P.C., 2016. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. *Soil and Tillage Research* 156, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.005>
- Cherubin, M.R., Karlen, D.L., Franco, A.L.C., Tormena, C.A., Cerri, C.E.P., Davies, C.A., Cerri, C.C., 2016. Geoderma Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil ☆. *Geoderma* 267, 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.004>
- Chioderoli, C.A., Mello, L.M.M. De, Grigolli, P.J., Furlani, C.E.A., Silva, J.O.R., Cesarin, A.L., 2012. Atributos físicos do solo e produtividade de soja em sistema de consórcio milho e braquiária Physycal properties of soil and yield of soybeans in corn braquiaria consortium 37–43.
- Cleasby, I.R., Nakagawa, S., 2011. Neglected biological patterns in the residuals. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 65, 2361–2372. <https://doi.org/10.1007/s00265-011-1254-7>
- Conab, 2019. Acompanhamento da safra brasileira de grãos 2018/19.
- Crusciol, C.A.C., Mateus, G.P., Nascente, A.S., Martins, P.O., Borghi, E., Pariz, C.M., 2012. An innovative crop-forage intercrop system: Early cycle soybean cultivars and palisadegrass. *Agronomy Journal* 104, 1085–1095. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0002>

- Crusciol, C.A.C., Nascente, A.S., Mateus, G.P., Pariz, C.M., Martins, P.O., Borghi, E., 2014. Intercropping soybean and palisade grass for enhanced land use efficiency and revenue in a no till system. *European Journal of Agronomy* 58, 53–62.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.05.001>
- Dane, J.H., Topp, G.C., 2002. *Methods of Soil Analysis. Part 4 - Physical Methods*.
- Derpsch, R., Friedrich, T., Kassam, A., Hongwen, L., 2010. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *Int J Agric & Biol Eng* 3, 01-25.
<https://doi.org/10.3965/j.issn.1934-6344.2010.01.001-025>
- Deuschle, D., Minella, J.P.G., Hörbe, T. de A.N., Londero, A.L., Schneider, F.J.A., 2019. Erosion and hydrological response in no-tillage subjected to crop rotation intensification in southern Brazil. *Geoderma* 340, 157–163.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.010>
- Dexter, A.R., 2004. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120, 201–214.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.005>
- Eberhardt, D.N., Vendrame, P.R.S., Becquer, T., Guimarães, M.D.F., 2008. Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em Latossolos sob pastagens no Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32, 1009–1016.
- Fageria, N.K., Baligar, V.C., 2001. Improving nutrient use efficiency of annual crops in Brazilian acid soils for sustainable crop production. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32, 1303–1319. <https://doi.org/10.1081/CSS-100104114>
- Ferreira, D.F., Cargnelutti Filho, A., Lúcio, A.D., 2012. Procedimentos estatísticos em planejamentos experimentais com restrição na casualização. *Boletim Informativo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo* 37, 9–9.
- Ferreira, M.M., Fernandes, B., Curi, N., 1999. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 23, 515–524.
- Gao, Y., Duan, A., Qiu, X., Liu, Z., Sun, J., Zhang, J., Wang, H., 2010. Distribution of roots and root length density in a maize/soybean strip intercropping system. *Agricultural Water Management* 98, 199–212. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.08.021>

- Garcia, R.A., Crusciol, C.A.C., Calonego, J.C., Rosolem, C.A., 2008. Potassium cycling in a corn-brachiaria cropping system. *European Journal of Agronomy* 28, 579–585.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.01.002>
- Goedert, W.J., 1983. Management of the Cerrado soils of Brazil : a review. *Journal of Soil Science* 34, 405–428.
- Grohmann, F., 1960. Distribuição tamanho de poros em três tipos de solos do estado de São Paulo. *Bragantia - Boletim Técnico do Instituto Agronomico do Estado de São Paulo*.
- Iglesias, A., Garrote, L., 2015. Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe. *Agricultural Water Management* 155, 113–124.
- Kassam, A., Friedrich, T., Derpsch, R., 2018. Global spread of Conservation Agriculture. *International Journal of Environmental Studies* 00, 1–23. <https://doi.org/10.1080/00207233.2018.1494927>
- Ker, J.C., 1997. Latossolos do Brasil: Uma revisão. *Geonomos* 5, 17–40.
- Klute, A., 1986. Water retention: laboratory methods, in: *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. ASA and SSSA, Madison. pp. 635–662.
<https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c26>
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., & Christensen, R.H.B., 2014. lmerTest: tests for random and fixed effects for linear mixed effect models (lmer objects of lme4 package). R package version 2.0-6. Retrieved in July 7.
- Lal, R., Reicosky, D.C., Hanson, J.D., 2007. Evolution of the plow over 10 , 000 years and the rationale for no-till farming. *Soil & Tillage Research* 93, 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2006.11.004>
- Leão, T.P., da Silva, A.P., Macedo, M.C.M., Imhoff, S., Euclides, V.P.B., 2006. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. *Soil and Tillage Research* 88, 279–285. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.06.014>
- Lenth, R. V., 2016. Least-squares means: The R package lsmeans. *Journal of Statistical Software* 69. <https://doi.org/10.18637/jss.v069.i01>
- Lopes, A.S., 1984. Solos sob “Cerrado”: Características, propriedades e manejo. Piracicaba:

Associação Brasileira para pesquisa da Potassa e do Fósforo 2ª edição, 162p.

- Lopes, A.S., Cox, F.R., 1977. A Survey of the Fertility Status of Surface Soils Under “Cerrado” Vegetation in Brazil. *Soil Science Society of America Journal* 41, 742–747.
- Mancuso, M.A.C., Soratto, R.P., Crusciol, C.A.C., Castro, G.S.A., 2014. Effect of potassium sources and rates on arabica coffee yield, nutrition, and macronutrient export. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38, 1448–1456. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000500010>
- Merten, G.H., Araújo, A.G., Biscaia, R.C.M., Barbosa, G.M.C., Conte, O., 2015. No-till surface runoff and soil losses in southern Brazil. *Soil and Tillage Research* 152, 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.03.014>
- Moreira, W.H., Tormena, C.A., Karlen, D.L., Silva, A.P., Keller, T., Betioli Júnior, E., 2016. Seasonal changes in soil physical properties under long-term no-tillage. *Soil & Tillage Research* 160, 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.02.007>
- Nascente, A.S., Crusciol, C.A.C., Cobucci, T., 2013. The no-tillage system and cover crops — Alternatives to increase upland rice yields. *European Journal of Agronomy* 45, 124–131. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.09.004>
- Oliveira, L.B., 1968. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada. *Pesquisa agropecuária brasileira* 3, 197–200.
- Panagos, P., Standardi, G., Borrelli, P., Lugato, E., Montanarella, L., Bosello, F., 2018. Cost of agricultural productivity loss due to soil erosion in the European Union: From direct cost evaluation approaches to the use of macroeconomic models. *Land Degradation and Development* 29, 471–484. <https://doi.org/10.1002/ldr.2879>
- Pariz, C.M., Costa, C., Crusciol, C.A.C., Meirelles, P.R.L., Castilhos, A.M., Andreotti, M., Costa, N.R., Martello, J.M., Souza, D.M., Protes, V.M., Longhini, V.Z., Franzluebbbers, A.J., 2017. Production, nutrient cycling and soil compaction to grazing of grass companion cropping with corn and soybean. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 108, 35–54. <https://doi.org/10.1007/s10705-016-9821-y>
- Peixoto, D.S., Silva, B.M., de Oliveira, G.C., Moreira, S.G., da Silva, F., Curi, N., 2019. A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under

- continuous no tillage system in Brazil. *Soil and Tillage Research* 194, 104307.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104307>
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R., Blair, R., 1995. Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits. *Science* 267.
- Pittelkow, C.M., Linquist, B.A., Lundy, M.E., Liang, X., van Groenigen, K.J., Lee, J., van Gestel, N., Six, J., Venterea, R.T., van Kessel, C., 2015. When does no-till yield more? A global meta-analysis. *Field Crops Research* 183, 156–168.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.020>
- Reichert, J.M., da Rosa, V.T., Vogelmann, E.S., da Rosa, D.P., Horn, R., Reinert, D.J., Sattler, A., Denardin, J.E., 2016. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. *Soil and Tillage Research* 158, 123–136.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2015.11.010>
- Resende, M., Curi, N., Rezende, S.B., Corrêa, G.F., 2007. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. Lavras: Editora UFLA 5. ed. rev, 322 p.
- Resende, A. V., Silva, A.F., Borghi, E., Gontijo Neto, M.M., Shiratsuchi, L.S., Pitta, R.M., Ferreira, A., 2016. Tomada de decisão quanto a adubação e manejo de nutrientes por agricultores do Mato Grosso: dados do Circuito Tecnológico 2015. Documentos/Embrapa Milho e Sorgo.
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Yang, X.M., Tan, C.S., 2008. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma* 146, 466–474. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.06.017>
- Safadoust, A., Feizee, P., Mahboubi, A.A., Gharabaghi, B., Mosaddeghi, M.R., Ahrens, B., 2014. Least limiting water range as affected by soil texture and cropping system. *Agricultural Water Management* 136, 34–41.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.01.007>
- Santos, H.G., Jacomine, P.K.T., Anjos, L.H.C., Oliveira, V.A., Oliveira, J.B., Coelho, M.R., Lumberras, J.F., Cunha, T.J.F., 2013. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos 3^a edição revista e ampliada. [https://doi.org/ISBN 978-85-7035-198-2](https://doi.org/ISBN%20978-85-7035-198-2)

- Santos, W.O., Mattiello, E.M., Marciano, L., Antônio, W., Abrahão, P., Novais, R.F. De, Cantarutti, R.B., 2015. Thermal and chemical solubilization of verdete for use as potassium fertilizer. *International Journal of Mineral Processing* 140, 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.05.003>
- Schaefer, C.E.G.R., Fabris, J.D., Ker, J.C., 2008. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): a review. *Clay Minerals* 43, 137–154. <https://doi.org/10.1180/claymin.2008.043.1.11>
- Severiano, E. da C., Oliveira, G.C. De, Dias Junior, M.D.S., Costa, K.A. de P., Silva, F.G., Ferreira Filho, S.M., 2011. Structural changes in Latosols of the Cerrado region: I – Relationships between soil physical properties and least limiting. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 35, 773–782.
- Severiano, E.C., Oliveira, G.C., Dias Júnior, M.S., Costa, K.A.P., Silva, F.G., Ferreira Filho, S.M., 2011. Structural changes in Latosols of the Cerrado region: I - Relationships between soil physical properties and least limiting water range. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 35, 773–782.
- Silva, B.M., da Silva, E.A., de Oliveira, G.C., Ferreira, M.M., Serafim, M.E., 2014. Plant-Available Soil Water Capacity: Estimation Methods and Implications. *Revista Brasileira De Ciencia Do Solo* 38, 464–475. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200011>
- Silva, B.M., Oliveira, G.C., Serafim, M.E., da Silva, E.A., Ferreira, M.M., Norton, L.D., Curi, N., 2015. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. *Soil & Tillage Research* 154, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.013>
- Silva, B.M., Oliveira, G.C., Serafim, M.E., Silva, É.A., Ferreira, M.M., Norton, L.D., Curi, N., 2015. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. *Soil and Tillage Research* 154, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.013>
- Silva Junior, E.C., Wadt, L.H.O., Silva, K.E., Lima, R.M.B., Batista, K.D., Guedes, M.C., Carvalho, G.S., Carvalho, T.S., Reis, A.R., Lopes, G., Guilherme, L.R.G., 2017. Natural variation of selenium in Brazil nuts and soils from the Amazon region. *Chemosphere* 188, 650–658. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.158>
- Six, J., Feller, C., Denef, K., Ogle, S., Sa, J.C. de M., Albrecht, A., 2002. Soil organic matter,

- biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie* 22, 755–775. <https://doi.org/10.1051/agro>
- Soil Survey Staff, 2014. Keys to soil taxonomy. Usda 12, 410. <https://doi.org/10.1109/TIP.2005.854494>
- Srayeddin, I., Doussan, C., 2009. Estimation of the spatial variability of root water uptake of maize and sorghum at the field scale by electrical resistivity tomography. *Plant and Soil* 319, 185–207. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9860-5>
- Taiyun Wei, M., 2017. Title Visualization of a Correlation Matrix. *Statistician* 56, 316–324.
- Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A., Teixeira, W.G., 2017. Manual de Métodos de Análise de Solo, 3 ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa.
- Timossi, P.C., Durigan, J.C., Leite, G.J., 2007. Formação de palhada por braquiárias para adoção do sistema plantio direto. *Bragantia* 66, 617–622.
- Torres, J.L.R., Pereira, M.G., 2008. Dinâmica do potássio nos resíduos vegetais de plantas de cobertura no Cerrado. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 32, 1609–1618.
- Tuzzin de Moraes, M., Debiasi, H., Carlesso, R., Cezar Franchini, J., Rodrigues da Silva, V., Bonini da Luz, F., 2016. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. *Soil and Tillage Research* 155, 351–362. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.07.015>
- Wickham, H., 2017. Package “tidyverse.” Cran-R 1–5.
- Wischmeier W., Smith, D., 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning.
- Yoder, R.E., 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Agronomy Journal* 28, 337–351.
- Zhang, L., Wang, J., Bai, Z., Lv, C., 2015. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area. *Catena* 128, 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.01.016>