

GUSTAVO FERREIRA DA SILVA

**ARMAZENAMENTO E DISPONIBILIDADE DE ÁGUA NO SOLO PARA AS
PLANTAS EM SISTEMAS DE MANEJO DE LONGA DURAÇÃO**

Botucatu

2019

GUSTAVO FERREIRA DA SILVA

**ARMAZENAMENTO E DISPONIBILIDADE DE ÁGUA NO SOLO PARA AS
PLANTAS EM SISTEMA DE MANEJO DE LONGA DURAÇÃO**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Agronomia (Agricultura).

Orientador: Prof. Dr. Juliano Carlos
Calonego

Botucatu

2019

S586a	Silva, Gustavo Ferreira da Armazenamento e disponibilidade de água no solo para as plantas em sistemas de manejo de longa duração / Gustavo Ferreira da Silva. -- , 2019 98 p. : il., tabs. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Araraquara, Orientador: Juliano Carlos Calonego 1. Física do solo. 2. Semeadura direta. 3. Preparo convencional do solo. 4. Água no solo. 5. Análise multivariada. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Araraquara. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

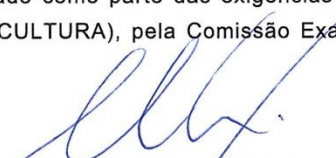
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ARMAZENAMENTO E DISPONIBILIDADE DE ÁGUA NO SOLO PARA AS PLANTAS EM SISTEMAS DE MANEJO DE LONGA DURAÇÃO

AUTOR: GUSTAVO FERREIRA DA SILVA

ORIENTADOR: JULIANO CARLOS CALONEGO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. JULIANO CARLOS CALONEGO
Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP - Câmpus de Botucatu



Prof. Dr. MARCELO DE ALMEIDA SILVA
Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - UNESP



Prof. Dr. FERNANDO FERRARI PUTTI
Engenharia de Biosistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã

Botucatu, 22 de julho de 2019

Dedico

Aos meus pais, Manoel e Maria Valdineia,

*e a minha irmã Gabrieli, que sempre me
apoiaram e estiveram ao meu lado.*

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo direcionamento, condução e proteção durante toda minha vida.

Aos meus queridos pais e minha irmã pelo apoio incondicional.

Ao Prof. Dr. Juliano Carlos Calonego, pela orientação, ensinamentos, paciência e exemplo de professor e pessoa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro, concedido por meio de bolsa de mestrado.

À Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP – Botucatu/SP pelas condições oferecidas e pela possibilidade de realização deste curso.

Ao Bruno Cesar Ottoboni Luperini por toda paciência, confiança, dedicação, compreensão, amizade, conselhos, pelas palavras sinceras, por me ouvir e pelo carinho a mim dispensado. Agradeço a Deus a oportunidade de conhecê-lo.

Aos amigos de longa data Adriano Pereira Mandarin, Adeilson Nascimento da Silva, Altacis Júnior de Oliveira, Izadora C. V. S. Camilo, Luanna Nascimento Sousa; Patrícia Gomes Mussato e Sérgio Esteves de Freitas, pelas palavras de conforto, carinho, afeto, sinceridade e principalmente por esta incrível amizade.

Ao Prof. Dr. Cassiano Cremon e à Prof^a. Dr^a. Nilbe Carla Mapeli por todo ensinamento científico e pessoal, pelo direcionamento e incentivo na pesquisa e pelo exemplo de pessoas.

Aos docentes e funcionários do Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal e em especial aos funcionários Casimiro Edson Alves e Ciro Venâncio de Oliveira que ajudaram na condução do experimento em campo.

Ao Prof. Dr. Marcelo de Almeida Silva e Vicente Mota da Silva pelas colaborações com as análises fisiológicas.

Ao Prof. Dr. Sérgio Augusto Rodrigues pela ajuda nas análises estatística.

Ao Prof. Dr. Fernando Ferrari Putti pelo apoio, orientações, parcerias e por participar da banca de defesa.

Ao João Paulo Gonsiorkiewicz Rigon e Juan Piero Antonio Raphael pela ajuda com os dados de física do solo.

À minha amiga Elizabete de Jesus Pinto por todo carinho, conselho, paciência e pela ajuda nas análises estatística que pareciam infinitas.

Aos amigos que conheci no mestrado e que são de grande importância: Alice Mota Oliveira Leite, Bárbara Fernanda da Silva, Camila da Silva Grassmann, Erilene

Romeiro Alves, Hugo Mota Ferreira Leite, Igor Vilela, Juslei Figueiredo, Larissa Chamma, Lidiane Fernandes Colombari, Lydia Helena da Silva de Oliveira Mota, Michely Alves da Silva, Natália Assunção e Príncilla Pâmela Nunes Chaves. A todos vocês meu agradecimento pelo acolhimento, amizade, paciência e companheirismo.

Ao Elidinaldo Dos Santos, Matheus Simões Antonio, Pedro Augusto Soares e Vinícius Brasil Silveira pela colaboração na condução do experimento em campo e pela ajuda nas análises.

À minha família pelo incentivo e força.

A todos que encontrei nesta caminhada e que de uma maneira ou outra contribuíram para realização deste sonho.

“Bom mesmo é ir a luta com determinação, abraçar a vida e viver com paixão, perder com classe e vencer com ousadia, pois o triunfo permanece a quem se atreve e a vida é muito bela para ser insignificante”.

Charlie Chaplin

RESUMO

Os sistemas de manejo do solo podem influenciar o armazenamento e a disponibilidade de água no solo. Todavia, ainda há divergência na literatura quanto aos efeitos deste manejo nas propriedades físicas do solo e nas respostas das plantas, devido aos diferentes tempos de adoção em cada trabalho. Pesquisas em áreas já consolidadas podem gerar dados mais precisos em relação a estas modificações, considerando que na fazenda experimental da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA/UNESP), Botucatu (SP), há experimentos de longa duração com sistemas de manejo, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de manejos do solo de longa duração na capacidade de armazenamento de água no solo e sua disponibilidade às plantas, bem como na resposta das plantas de soja. Para isso foram conduzidos dois experimentos. O primeiro comparou o efeito do sistema de semeadura direta com o preparo convencional do solo, ambos conduzidos por 32 anos. O segundo experimento comparou o efeito do sistema de semeadura direta com diferentes rotações de culturas durante a safra de primavera, sendo testado o efeito do milho, crotalária e um tratamento com ausência de cultivo de plantas, porém com escarificação do solo a cada três anos. Os sistemas de manejo alteraram as propriedades físico-hídricas do solo, sendo que os sistemas sem revolvimento do solo garantiram menor vulnerabilidade ao déficit hídrico às plantas de soja. E apesar dos sistemas conduzidos sob semeadura direta apresentarem maior resistência do solo à penetração das raízes nas camadas superficiais, não houve comprometimento do sistema radicular e não afetou a produtividade da soja.

Palavras-chave: Análise multivariada. Déficit hídrico. Sistema de preparo convencional. Sistema de semeadura direta.

ABSTRACT

Soil management systems can influence the storage and availability of water in the soil. However, there is still divergence in the literature regarding the effects of this management on soil physical properties and plant responses, due to the different implementation times used. Research in already consolidated areas can generate more precise data in relation to these modifications, considering that in the experimental farm of the School of Agricultural Sciences (FCA/UNESP), Botucatu (SP), there are long - term experiments with management systems, the aim of this study was to evaluate the effect of long - duration of soil water storage capacity and their availability to plants, as well as the response of soybean plants. For this, two experiments were conducted. The first one compared the effect of the no-tillage system with conventional tillage, both conducted for 32 years. The second experiment compared the effect of the no - tillage system with different crop rotations during the spring harvest, being the effect of millet, sunn hemp and a treatment with no plant cultivation was tested, but with chiseling soil each three years. Management systems altered the physical and hydraulic properties of the soil, being that the no-tillage systems ensured less vulnerability to the drought stress to the soybean plants. And although the no-tillage systems presented greater soil resistance to root penetration in the superficial depth, there was no root system compromise and did not affect the soybean yield.

Keywords: Multivariate analysis. Drought stress. No-tillage. Tillage

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	17
CAPÍTULO 1 - PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO, ARMAZENAMENTO E DISPONIBILIDADE DE ÁGUA EM SISTEMA DE MANEJO CONSOLIDADO	20
1.1 INTRODUÇÃO	21
1.2 MATERIAL E MÉTODOS	23
1.2.1 Localização	23
1.2.2 Histórico e condução das áreas experimentais	23
1.2.2.1 Experimento I	23
1.2.2.2 Experimento II	25
1.2.3 Avaliações na planta	25
1.2.4 Avaliações no solo (safras 2017/18)	26
1.2.5 Análise estatística	27
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
1.3.1 Experimento I	28
1.3.2 Experimento II	39
1.4 CONCLUSÕES	49
REFERÊNCIAS	50
CAPÍTULO 2 - ANÁLISE MULTIVARIADA EM PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO E NA RESPOSTA DE PLANTAS DE SOJA CULTIVADAS EM SISTEMAS DE MANEJO DE LONGA DURAÇÃO	56
2.1 INTRODUÇÃO	57
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	59
2.2.1 Localização	59
2.2.2 Histórico e condução das áreas experimentais	59
2.2.2.1 Experimento I	59
2.2.2.2 Experimento II	60
2.2.3 Avaliações na cultura	61
2.2.4 Avaliações no solo	63
2.2.5 Análise estatística	64
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	65

2.3.1	Experimento I	65
2.3.2	Experimento II	79
2.4	CONCLUSÕES	92
	REFERÊNCIAS	92
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
	REFERÊNCIAS	95

INTRODUÇÃO GERAL

A forma como as partículas de areia, silte, argila e matéria orgânica se organizam determinam a estrutura do solo, formando os agregados (DORAN; PARKIN, 1994). A união dessas frações se dá em função da ação de forças mecânicas (força da gravidade, crescimento de raízes, contração e expansão do solo, ação da fauna, etc.) que age na aproximação dessas partículas; e por ação cimentante (argila, matéria orgânica, óxidos de ferro e alumínio, micélios de fungos e actinomicetos, polissacarídeos, etc.) responsável pela ligação entre essas unidades (EDWARDS; BREMNER, 1967; TISDALL; OADES, 1982; MILLER; JASTROW, 1990; GOLCHIN et al., 1998; SCHJONNING et al., 2007). A maneira como essas frações se organizam determina a porosidade do solo e sua capacidade de suporte para o desenvolvimento vegetal, interferindo diretamente na capacidade de armazenamento e disponibilidade de água às plantas (DEXTER et al., 2008).

Nem sempre a maior capacidade de armazenamento de água no solo, pode significar maior disponibilidade à planta. A armazenagem depende de aspectos como o espaço poroso e a profundidade do solo, enquanto a disponibilidade depende de fatores intrínsecos do solo e da capacidade das plantas em extrair água nos diferentes teores de umidade e níveis de energia de retenção (PETRY et al., 2007).

Em situações de déficit hídrico no solo, as plantas desenvolvem mecanismos adaptativos que lhes permitem sobreviver sob estas condições. O fechamento estomático é a primeira linha de defesa contra a desidratação. Estresse por seca e consequente fechamento estomatal, leva à exposição de excesso de energia na planta, que, se não for dissipada com segurança, pode causar excitação no centro de reação do fotossistema PSII (PINHEIRO; CHAVES, 2011), levando à fotoinibição (TAKAHASHI; BADGER, 2011).

A resposta ao déficit hídrico, bem como a capacidade de recuperação é dependente da espécie, idade da planta e severidade do estresse (FOSTER et al., 2015), podendo promover alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas, como manutenção da estabilidade da membrana, ajuste osmótico e acúmulo de fitohormônios (XU et al., 2009; HU et al., 2010; SHI et al., 2014).

Assim, entender a dinâmica da água no solo torna-se fundamental para o correto planejamento das atividades agrícolas, sendo a água o fator que com maior frequência afeta a produtividade das culturas (ABDALLAH et al., 2014).

Vários fatores estão relacionados com a capacidade de armazenamento de água no solo e com a disponibilidade desta às plantas, todavia, um dos principais é o sistema de manejo do solo, pois modificam as propriedades físicas do solo associadas à estrutura, como a disponibilidade de água, aeração e a resistência ao crescimento das raízes (TORMENA et al., 1998), diretamente relacionadas ao desenvolvimento das plantas. Porém, a amplitude desta influência depende do clima e das propriedades de solos, principalmente a textura e a estrutura (DEXTER et al., 2008).

No preparo convencional, a compactação é um problema recorrente, devido ao intenso tráfego de máquinas, que é considerado o principal motivo de compactação em áreas agricultáveis (FLOWERS; LAL, 1998; SILVA et al., 2011). A compactação reduz o volume de poros (REICHERT et al., 2007; BERGAMIN et al., 2010) e aumenta a resistência do solo à penetração das raízes (STONE et al., 2002), afetando a sua distribuição e morfologia (TAVARES FILHO et al., 2001), interferindo diretamente na absorção de água e nutrientes (TAIZ; ZEIGER, 2013). Reduz, também, a infiltração e a disponibilidade de ar e água para as plantas, além de contribuir com a erosão hídrica do solo, devido a menor velocidade de infiltração da água (BRONICK; LAL, 2005).

A adoção de sistemas conservacionistas do solo constitui-se em alternativas eficazes para minimizar a compactação (DOMIT et al., 2014). Pois, um solo com adequada estrutura apresentará agregados estáveis e melhor distribuição de poros e, por consequência, melhor infiltração e armazenamento de água, refletindo assim na produtividade das plantas (SCHOENHOLTZ et al., 2000).

Dentre as medidas conservacionistas da qualidade do solo, o Sistema de Semeadura Direta (SSD) tem sido muito utilizado e estudado na agricultura brasileira, apresentando aproximadamente 33 milhões de hectares cultivados (FEBRAPDP, 2018). Este sistema baseia-se na mobilização de solo apenas na linha de semeadura, manutenção permanente da cobertura do solo, diversificação de espécies e minimização ou supressão do intervalo de tempo entre colheita e semeadura de forma a contribuir para conservação do solo e da água (LEAL et al., 2008; FEBRAPDP, 2012).

A formação da cobertura morta do solo, promovida pelo SSD, proporcionada pela rotação de culturas (CHUNG et al., 2008; SALVO et al., 2010), além de atuar na redução da erosão (SHICK et al., 2000), e no aumento da capacidade de retenção da umidade do solo (SALTON; MIELNICZUK; 1995), promove o incremento no conteúdo de matéria orgânica (BAYER; SCHNEIDER, 1999; COSTA et al., 2004).

Contudo, nem sempre são evidenciados os benefícios deste sistema na física do solo, o que pode ser atribuído principalmente ao fato de que a maioria dos trabalhos são realizados em experimentos de curto e médio prazo de implantação, sem considerar a fase em que se encontra o SSD. Desta forma, é necessário que a qualidade física do solo em SSD seja avaliada em experimentos já consolidados (MORAES, 2013).

Na Faculdade de Ciências Agrônômicas, Câmpus de Botucatu - FCA/UNESP, há experimentos de longa duração comparando sistemas de manejo do solo (SORATTO et al., 2014; CALONEGO et al., 2017), o que permite relacionar com maior confiança as possíveis modificações que esses manejos possam ter promovido na estrutura física do solo, com o armazenamento e disponibilidade de água para as plantas. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito dos sistemas de manejo de longa duração nas propriedades físicas do solo, na capacidade de armazenamento e disponibilidade de água no solo e na resposta das plantas de soja.

Para atingir o objetivo proposto, o presente trabalho foi dividido em dois capítulos, sendo o primeiro intitulado “PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO, ARMAZENAMENTO E DISPONIBILIDADE DE ÁGUA EM SISTEMA DE MANEJO CONSOLIDADO” e o segundo intitulado “ANÁLISE MULTIVARIADA EM PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO E NA RESPOSTA DE PLANTAS DE SOJA CULTIVADAS EM SISTEMAS DE MANEJO DE LONGA DURAÇÃO”.

CAPÍTULO 1

PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO, ARMAZENAMENTO E DISPONIBILIDADE DE ÁGUA EM SISTEMA DE MANEJO CONSOLIDADO

Resumo

Experimentos de curto a médio prazo de implantação nem sempre demonstram os benefícios do sistema de semeadura direta (SSD) na física do solo. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades físicas do solo em sistema de manejo de longa duração e relacioná-la com o armazenamento e disponibilidade de água às plantas, verificando seu efeito na produtividade da cultura da soja. Foram conduzidos dois experimentos. O experimento I foi conduzido em SSD desde 1986, em blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições, sendo as parcelas compostas por dois manejos de solos (semeadura direta e preparo convencional) e as subparcelas representadas por três profundidades do solo (0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m). O experimento II foi manejado em sistema de semeadura direta desde 2003, em delineamento em blocos casualizados com parcelas subdivididas e quatro repetições. As parcelas foram compostas por três sistemas de manejo na safra da primavera (cultivo de crotalária, milho e escarificação do solo) e as subparcelas pelas três profundidades do solo (0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m). No primeiro experimento o sistema de semeadura direta apresentou maior densidade e resistência do solo à compactação até a profundidade de 0,20 m, porém nesta camada também houve maior desenvolvimento radicular. Também apresentou menor vulnerabilidade ao déficit hídrico. No experimento com diferentes rotações de cultura, o tratamento com escarificação do solo apresentou menores valores de resistência do solo à compactação e maior porosidade total, porém apresentou menor disponibilidade de água às plantas. A não movimentação do solo não prejudicou o processo de infiltração de água no solo, sendo que o tratamento com milho ofereceu menor risco ao déficit hídrico às plantas. Os sistemas de manejo não afetaram a produtividade da soja, porém afetaram as propriedades físicas do solo e a capacidade de armazenamento e de disponibilidade de água no solo.

Palavras-chave: Crotalária. Escarificação. Déficit hídrico. Milho. Plantio direto. Preparo convencional.

Abstract

Short to medium-term implementation experiments do not always demonstrate the benefits of no-tillage (NT) in soil physics. Thus, the aim of this study was to evaluate the physical properties of the soil in a long-term management system and to relate it to the storage and availability of water to the plants, verifying its effect on yield soybean. Two experiments were conducted. Experiment I was conducted in SSD since 1986, in randomized blocks, in split-plot scheme, with four replications, being as plots composed by soil management (no-tillage and conventional tillage) and as subplots represented by 3 soil depths (0.00-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.40 m). Experiment II was managed in no-tillage system since 2003, in a randomized complete block design with split-plot and 4 replicates. The plots were composed of three management systems in the spring crop (sunn hemp, millet and chiseling of the soil) and the subplots at 3 soil depths (0.00-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.40 m). In the experiment I, the no-tillage system presented higher density and soil resistance to compaction up to a depth of 0.20 m, but in this depth there was also greater root development. Also presented less vulnerability to drought stress. In the experiment with different crop rotations, treatment with soil chiseling presented lower values of soil resistance to compaction and higher total porosity, but presented lower water availability to the plants. The no-tillage did not affect the process of water infiltration in the soil, and the millet provided a lower risk to the drought stress of the plants.

Keywords: Sunn hemp; Chiseling. Drought stress. Millet. No-tillage. Tillage.

1.1 INTRODUÇÃO

A melhoria e manutenção da qualidade física do solo deve ser requisito fundamental nos sistemas de manejos das áreas agrícolas, pois é fator determinante na produtividade da cultura e está diretamente ligada a capacidade de armazenamento e disponibilidade de água às plantas (Franchini et al., 2011). Entretanto, dependendo do sistema de manejo adotado pode haver melhoria, manutenção ou perturbações na física do solo.

Há vários estudos comparando os efeitos do preparo convencional (SPC) e do sistema de semeadura direta (SSD) nas alterações das propriedades físicas do solo, porém sem relacioná-las com a disponibilidade de água às plantas ao longo do

cultivo (Pedrotti et al., 2005; Bamberg et al., 2009; Lima et al., 2009; Munareto et al., 2010).

Normalmente, em áreas de SPC o solo apresenta menor taxa de infiltração de água, menor capacidade de armazenamento e menor disponibilidade às plantas, sendo um sistema com maior vulnerabilidade à cultura em períodos de veranicos ou secas (Bianchi, 2004; Damalgo et al., 2009; Mendonça et al., 2009).

Áreas de cultivo sob SSD, geralmente, apresentam as camadas superficiais mais compactadas, devido ao tráfego de máquinas e implementos agrícolas sem o revolvimento do solo, enquanto que em SPC são frequentemente revolvidos, modificando suas propriedades físico-hídricas em curto período de tempo, estando a camada compactada normalmente entre 0,10 a 0,20 m (Tormena et al., 1998; Tormena et al., 2004; Valente et al., 2019).

A maior densidade em SSD contribui para redução da porosidade total, devido à redução de macroporos e aumento dos microporos, principal responsável pela retenção de água no solo (Stone e Silveira, 2001; Cruz et al., 2003; Tormena et al., 2004; Secco et al., 2005; Valadão et al., 2015). Porém, o não revolvimento do solo proporciona maior continuidade dos poros, tornando a porosidade mais eficiente no transporte líquido e gasoso (Osunbitan et al., 2005; Hubert et al., 2007; Galdos et al., 2019).

Em SSD também é encontrado maior volume de mesoporos, contribuindo para a maior retenção de água. Damalgo et al. (2009) encontraram maior quantidade de mesoporos de diâmetros maiores (50 a 2,9 μm) em solo sob SSD até 0,15 m de profundidade, enquanto que no solo manejado sob SPC houve predominância de mesoporos com menores diâmetros (2,9 a 0,2 μm).

A diferença na distribuição do tamanho de mesoporos pode estar associada ao manejo que é dado ao solo, visto que em SSD, a maior quantidade de matéria orgânica (Bescansa et al., 2006) e a maior atividade de microrganismos e raízes, nas camadas mais próximas à superfície, associado ao revolvimento mínimo do solo na semeadura, permitem um processo de auto-organização do sistema. Enquanto, o revolvimento frequente pulveriza o solo em SPC, rompendo a conectividade e a estrutura dos poros (Galdos et al., 2019). Apesar do aumento na capacidade de retenção não significar necessariamente maior disponibilidade de água para as plantas, a maioria das pesquisas demonstram maior disponibilidade e armazenagem da água em SSD, principalmente em sistemas já consolidados (Salton e Mielniczuk,

1995; Drury et al., 1999; Lampurlanés et al., 2001, Bescansa et al., 2006; Vita et al., 2007; Zanette et al., 2007; Damalgo, 2009; Ribeiro et al., 2016).

Ribeiro et al. (2016) verificaram que em curtos períodos de estiagem (aproximadamente 10 dias) o solo sob SPC secou mais rápido, indicando que o SSD tem maior oferta hídrica às raízes superficiais. Damalgo et al. (2009) também encontraram maior disponibilidade de água no SSD, comparado ao SPC, até 0,45 m. Considerando esses resultados e o fato que maior parte do sistema radicular das culturas anuais se concentram nos primeiros centímetros de profundidade do solo, pode-se inferir também que o SSD pode retardar os sintomas de déficit hídrico às plantas e confere maior segurança na produção em períodos de veranicos.

O efeito positivo do SSD sobre a dinâmica da água no solo está associado também com a cobertura permanente do solo, pois reduz o impacto da gota da chuva sobre a superfície do solo, diminui o escoamento superficial e a evaporação da água na superfície (Hatfield et al., 2001; Baumhardt e Jones, 2002). Além desses fatores, o maior teor de matéria orgânica nas camadas superficiais contribui com a maior porosidade, favorecendo maior taxa de infiltração (Sobrinho et al., 2003; Hubert et al., 2007).

Diante disso, o objetivo deste estudo foi avaliar as propriedades físicas do solo em sistema de manejo de longa duração e relacioná-la com o armazenamento e disponibilidade de água às plantas, verificando seu efeito na produtividade da cultura da soja.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1 Localização

Foram conduzidos dois experimentos em Nitossolo Vermelho distrófico, na área experimental da Fazenda Lageado, na Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, localizada no município de Botucatu (SP), com latitude 22°49'S, longitude 48°25' WGrw e altitude de 786 m. O clima da região, segundo classificação de Köppen, é do tipo Cwa, que significa clima mesotérmico com inverno seco (Escobedo, 2009).

1.2.2 Histórico e condução das áreas experimentais

1.2.2.1 Experimento I

O experimento foi conduzido comparando Sistema Semeadura Direta (SSD) e Sistema de Preparo Convencional (SPC) desde 1986, sendo o histórico de cultivo apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Manejo do solo e sucessão de culturas no experimento I.

Ano agrícola	Sistema de manejo				Safr o outono-inverno/primavera-verão
	SPC		SSD		
	Outono	Primavera	Outono	Primavera	
1985/86	Aração + gradagem	Aração + gradagem	Aração + gradagem	Sem preparo	Trigo/soja
1986/87 a	Aração + gradagem	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Trigo/soja
1994/95					
1995/96 a	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Pousio/pousio
1998/99					
1999/00	Aração + gradagem	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Aveia preta/milho
2000/01 e	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Pousio/pousio
2001/02					
2002/03 e	Aração + gradagem	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Aveia preta/milheto-feijão
2003/04					
2004/05 e	Aração + gradagem	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Aveia preta/milho
2005/06					
2006/07	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Pousio/soja
2007/08	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Aveia amarela/feijão
2008/09	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Aveia amarela/feijão
2009/10 a	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Aveia preta/milho+baquiária
2011/12					
2012/13	Sem preparo	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Braquiária/soja
2013/14	Sem preparo	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Trigo/soja
2014/15	Sem preparo	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Cártamo/soja
2015/16	Sem preparo	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Cártamo/milho
2016/17	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Aveia preta/milho
2017/18	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Aveia preta/soja

O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições As parcelas (320 m²) foram constituídas pelos dois sistemas de manejo do solo (SSD e SPC) e as subparcelas foram compostas pelas três profundidades do solo (0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m).

1.2.2.2 Experimento II

A área foi conduzida em sistema de semeadura direta (SSD) entre os anos de 1997 e 2003 com a rotação soja/aveia preta/milho/tritcale. A partir de 2003 iniciou-se um experimento com diferentes rotações de culturas envolvendo plantas de cobertura. Desde então, no outono-inverno têm sido cultivado o tritcale (X *Triticosecale* Wittmack), na primavera têm sido cultivadas as espécies de plantas de cobertura milheto (*Pennisetum glaucum* L.) e crotalária juncea (*Crotalaria juncea* L.), havendo também um tratamento com ausência do cultivo de plantas de cobertura, no qual foi realizada escarificação em 2003, 2009, 2013 e 2016. E no verão foi cultivado soja em área total.

O experimento foi montado em delineamento de blocos casualizados em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições, sendo as parcelas (de 20 m²) constituídas por três sistemas de manejo (cultivo de crotalária, milheto e escarificação) e as subparcelas por três profundidades do solo (0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m).

Na Tabela 2 estão representados os esquemas de rotações de culturas utilizados no experimento II.

Tabela 2 - Esquema de rotação de culturas no experimento II.

Ano	Outono/inverno	Primavera	Verão
1997/98	--	--	Milho
1998/99	Triticale	--	Soja
1999/00	Aveia preta	--	Milho
2000/01	Triticale	--	Soja
2001/02	Aveia preta	--	Milho
2002/03	Triticale		Soja
2003/04 a 2016/2017	Triticale	Crotalária Milheto Pousio	Soja
2017/18	Milho	Crotalária Milheto Pousio	Soja

1.2.3 Avaliações na Planta

A cultivar de soja utilizada foi a TMG 7062 IPRO, a semeadura foi realizada em 08/12/2017 com densidade de 15 sementes por metro linear, e a colheita foi realizada 111 dias após a semeadura (29/03/2018).

A estimativa da produtividade da soja foi realizada após a maturidade fisiológica dos grãos (R9), colhendo-se as plantas da área útil das parcelas (4,5m²),

descartando as bordaduras, sendo o teor de água dos grãos corrigidos para 130 g kg⁻¹.

A análise de raiz foi realizada no momento do florescimento pleno da cultura. Para isso foram coletadas amostras de solo com trado “tipo caneca” (com volume conhecido) na profundidade de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40m, sendo quatro subamostras por profundidade para compor uma amostra. Após a coleta, as porções de solo contendo as raízes foram acondicionadas em sacos plásticos vedados e congeladas a -2°C, em seguida foram lavadas, colocadas em sacos de papel e secas em estufa de aeração forçada a 60°C por 48h para determinação da massa seca.

1.2.4 Avaliações no solo (safras 2017/18)

O conteúdo de água no solo (CA) foi determinado por meio sonda de capacitância (modelo Diviner®, Sentek Pt Ltda.) inserido em tubos de acesso instalados previamente nas áreas. O monitoramento do conteúdo de água foi realizado da superfície até 0,40 m de profundidade (intervalo de 0,10 m), com leituras ao 1, 3, 5, 8 e 15 dias após a chuva (DAC), considerando apenas as chuvas acima de 10 mm, sendo possível determinar a curva de secamento do solo. Os valores de água armazenada (AA) foi o resultado da soma dos valores de umidade até a profundidade de 0,40 m em cada unidade experimental; e para cada dia de leitura foi calculada a média de AA.

O acompanhamento do volume de chuva foi realizado por meio de observações no pluviômetro colocado em cada experimento.

Por ocasião das coletas de raízes foi realizado o teste de resistência do solo à penetração (RP) em três pontos por parcela, por meio do penetrômetro de impacto modelo IAA/ Planalsucar-Stolf (Stolf, 1984; Stolf et al., 2014).

Para a avaliação da densidade do solo (DS), macroporosidade (Mp), microporosidade (mp), porosidade total (PT), capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP), foram coletadas por parcela, duas amostras de solo com estrutura indeformada em cada profundidade, utilizando anéis volumétricos, pelo método da trincheira (Blake e Hartge, 1986; Smith e Mullins, 1991; EMBRAPA, 2017). Com os valores de CC e PMP foi possível calcular a capacidade máxima de água disponível (CAD), subtraindo-se do valor de umidade na CC a umidade no PMP (Reeve e Carter, 1991).

A infiltração de água no solo (IA) foi avaliada pelo método do infiltrômetro de anéis concêntricos, conforme Bernardo et al. (2006). Essa metodologia baseia-se no uso de dois anéis, que são posicionados de forma concêntricos no solo. O anel interno com diâmetro de 30 cm e o externo de 60 cm, ambos com 30 cm de altura. Os anéis foram cravados verticalmente 15 cm no solo. O anel externo tem como finalidade reduzir o efeito da dispersão lateral da água infiltrada do anel interno. Assim a água do anel interno infiltra no perfil do solo em uma direção predominante vertical, o que evita superestimativa da taxa de infiltração.

A leitura de infiltração foi realizada no anel interno, com auxílio de uma régua colocada verticalmente dentro do anel e a reposição do volume de água foi realizada sempre que o volume de água se aproximava de 5 cm dentro do anel. A leitura foi realizada até que a taxa de infiltração no anel interno tornou-se aproximadamente constante com o tempo (cinco valores semelhante). Foram realizadas leituras nos seguintes intervalos de tempo: cinco repetições de um minuto; cinco repetições de dois minutos; cinco repetições de cinco minutos; cinco repetições de dez minutos; cinco repetições de quinze minutos; cinco repetições de vinte minutos; e por fim, intervalos de trinta minutos, até que a taxa de infiltração se estabilizasse. Os dados experimentais foram ajustados pelas equações de infiltração conforme os modelos matemáticos propostos por Kostiakov-Lewis. Para obtenção do tempo da velocidade de infiltração básica (VIB), foi usada a equação 1.

$$VIB = \left(-\frac{0,001}{C.n.(n-1)} \right)^{\frac{1}{n-2}} \quad (1)$$

Em que VIB é a velocidade de infiltração básica; n é a declividade da reta, determinada no local para cada tipo de solo; e C é a constante que evidencia lâmina infiltrada no primeiro minuto, em cm.

1.2.5 Análise estatística

Os dados de foram submetidos à análise de variância e ao teste t de comparação de médias ao nível de 5% de probabilidade de erro utilizando-se o programa estatístico AgroEstat (Barbosa e Maldonado, 2015). Essas mesmas variáveis também foram submetidas à análise de correlação de Pearson pelo software Minitab® (Minitab®, 2018). E os dados da curva de secamento de água no solo em função dos dias após a chuva foram submetidos à análise de regressão no software Minitab (Minitab®, 2018).

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.3.1 Experimento I

Os valores de resistência do solo à penetração (RP), densidade do solo (DS), massa seca de raiz (MSR) e da capacidade máxima de água disponível (CAD) apresentaram interação significativa entre os sistemas de manejo e a profundidade do solo (Tabela 3).

Tabela 3 - Valores de resistência do solo à penetração (RP), densidade do solo (DS), massa seca de raiz (MSR) e capacidade máxima de água disponível (CAD) em sistema de manejo de longa duração nas profundidades de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. Botucatu-SP, 2019.

Manejo	RP (MPa)		
	Profundidade (m)		
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40
SPC	0,71 bB	1,62 aB	3,52 aA
SSD	4,11 aAB	4,40 aA	3,33 aB
Manejo	DS (g cm ⁻³)		
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40
SPC	1,04 bB	1,27 aA	1,24 aA
SSD	1,30 aAB	1,35 aA	1,26 aB
Manejo	MSR (kg ha ⁻¹)		
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40
SPC	1110 aA	136 bB	49 aB
SSD	1316 aA	1009 aA	131 aB
Manejo	CAD (cm ³ cm ⁻³)		
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40
SPC	0,054 aB	0,069 aA	0,047 bC
SSD	0,047 bB	0,037 bC	0,066 aA

Médias seguidas por letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Student (LSD) ao nível de 5% de probabilidade. SPD: sistema de preparo convencional; SSD: sistema de semeadura direta.

O sistema de preparo convencional (SPC) apresentou maior valor de RP na camada de 0,20 a 0,40 m. Estes valores concordam com os dados de DS, já que a maior densidade também foi encontrada nesta profundidade, apesar de não diferir da camada de 0,10 a 0,20 m. Já no sistema de semeadura direta (SSD) os valores de RP e DS se diferiram apenas entre as profundidades de 0,10 a 0,20 e de 0,20 a 0,40 m.

Comparando os manejos de solo, o SSD apresentou maior RP e DS na profundidade de 0,00 a 0,10 m. Este resultado era esperado, tendo em vista que no SSD não há revolvimento do solo e a pressão dos maquinários acaba resultando em uma camada superficial mais compactada, quando comparada com sistemas que há o revolvimento do solo (Jorge et al., 2012).

Quanto à massa seca de raiz, o SPC teve mais raiz na profundidade de 0,00 a 0,10 m, representando 85,7% da massa seca total de raiz deste tratamento. O SSD teve mais raiz nas duas primeiras profundidades avaliadas, apresentando cerca de 53,6% da massa seca de raiz na camada de 0,00 a 0,10 m e 41,1% na profundidade de 0,10 a 0,20 m. O SSD se diferiu do SPC apenas na profundidade de 0,10 a 0,20 m, contudo ao avaliar a produção total de raiz até a profundidade de 0,40 m, o SPC produziu aproximadamente 47,3% a menos que o SSD.

Desta forma, nota-se que apesar do SSD apresentar maior RP e DS na camada superficial, o desenvolvimento radicular não foi afetado, tendo em vista que não houve diferença estatística entre o SPC e o SSD nesta profundidade na produção de MSR.

Como o SSD prioriza o não revolvimento do solo, a cobertura permanente do solo e a rotação de cultura, é provável que a exploração radicular das diferentes culturas tenha favorecido a formação de bioporos; e o não revolvimento tenha contribuído para a maior continuidade dos poros (Galdos et al., 2019), assim não afetando o desenvolvimento radicular da cultura da soja, apesar do alto valor de RP e DS no SSD.

A capacidade máxima de água disponível no SPC foi menor que no SSD apenas na profundidade de 0,20 a 0,40 m, sendo que a CAD no SPC foi maior na profundidade de 0,10 a 0,20 m, enquanto que no SSD a foi maior na camada de 0,20 a 0,40 m. Esta maior capacidade de retenção de água na camada de 0,20 a 0,40 m no SSD pode significar maior capacidade de tolerância das plantas a déficits hídricos, tendo em vista que nesta profundidade o SSD apresenta menor RP e DS e quantidade de raiz superior ao SSD, assim tendo acesso mais fácil à água armazenada em profundidade, e consequentemente, tendo menos estresse em períodos de veranico.

Já os valores de macroporosidade (MP), microporosidade (mp) e porosidade total do solo não apresentaram interação significativa. Sendo que apenas a MP se diferiu entre os manejos (SPC e SSD), e em profundidade nenhuma destas variáveis foram diferentes (Tabela 4).

O SPC teve maior MP que o SSD, porém ambos os manejos apresentaram valores abaixo do nível crítico de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, valor mínimo de macroporosidade adequado para as trocas gasosas e líquidas entre o ambiente externo e o solo,

considerado crítico para o desenvolvimento radicular da maioria das espécies vegetais (Baver et al., 1972; Reichert et al., 2007). Segundo Lima e Lima (2009), os macroporos são responsáveis pela aeração, movimentação de água no perfil do solo e também pela penetração de raízes, contudo, apesar do SSD apresentar menor MP, isso não influenciou o desenvolvimento radicular da soja, já que o SSD teve maior quantidade massa seca de raiz que o SPC (Tabela 3).

Tabela 4 - Valores de macroporosidade (MP), microporosidade (mp) e porosidade total do solo em sistema de manejo de longa duração nas profundidades de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. Botucatu-SP, 2019.

Manejo	MP	mp cm ³ cm ⁻³	PT
SPC	0,09 a	0,44 a	0,53 a
SPD	0,06 b	0,44 a	0,50 a
Profundidade m	MP	mp cm ³ cm ⁻³	PT
0,00-0,10	0,09 a	0,43 a	0,52 a
0,10-0,20	0,07 a	0,44 a	0,51 a
0,20-0,30	0,07 a	0,44 a	0,51 a

Médias seguidas por letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Student (LSD) ao nível de 5% de probabilidade.

Segundo Torres e Saraiva (1999), em solos de textura argilosa é comum encontrar reduzida macroporosidade, devido à menor superfície específica das partículas. A probabilidade do volume de macroporos atingir valores críticos aumenta em solos argilosos conduzidos em SSD devido à ausência de mobilização do solo, e pela acomodação das partículas seja naturalmente ou por forças exercidas na superfície do solo (Richart et al., 2005).

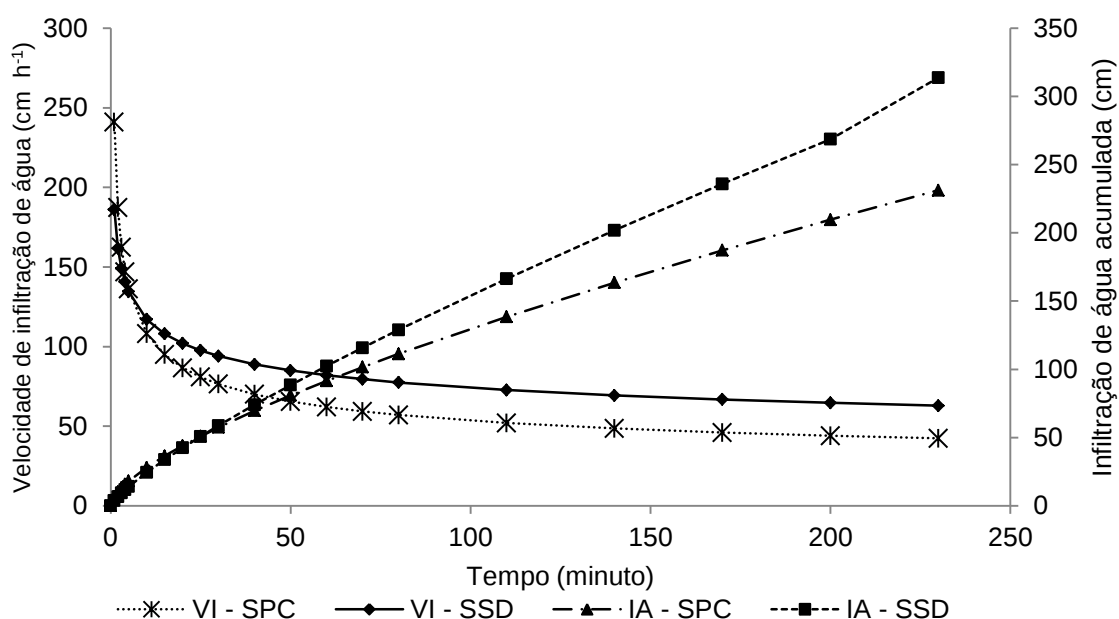
Para Abreu et al. (2004), o efeito da mobilização do solo sobre a macroporosidade não persiste devido à reconsolidação ocorrida em solos mobilizados e que recebem sucessivos ciclos de umedecimento e secagem.

Os resultados de velocidade de infiltração (VI) e infiltração acumulada (IA) de água no solo em SPC e SSD estão expostos na Figura 1. O SPC inicialmente apresentou alta VI de água no solo. No primeiro minuto de infiltração a VI no SPC foi de 241,02 cm h⁻¹, enquanto que no SSD foi de 186,12 cm h⁻¹, sendo a VI no SPC 22,78% maior que no SSD. Todavia a partir de dez minutos de infiltração de água o SSD apresentou maior VI, com aumento constante até os primeiros 60 minutos,

após este tempo os valores permanecem praticamente constante, cerca de 30% maior que no SPC.

A IA permaneceu praticamente constante entre os sistemas de manejo até 150 minutos, após este tempo houve maior infiltração de água no solo no SSD, sendo que no final do teste o SSD apresentou aproximadamente 33% a mais de água infiltrada que o SPC.

Figura 1 - Velocidade de infiltração (VI) e infiltração acumulada (IA) de água no solo em sistema de preparo convencional (SPC) e sistema de semeadura direta (SSD) em áreas de manejo já consolidado. Botucatu-SP, 2019.

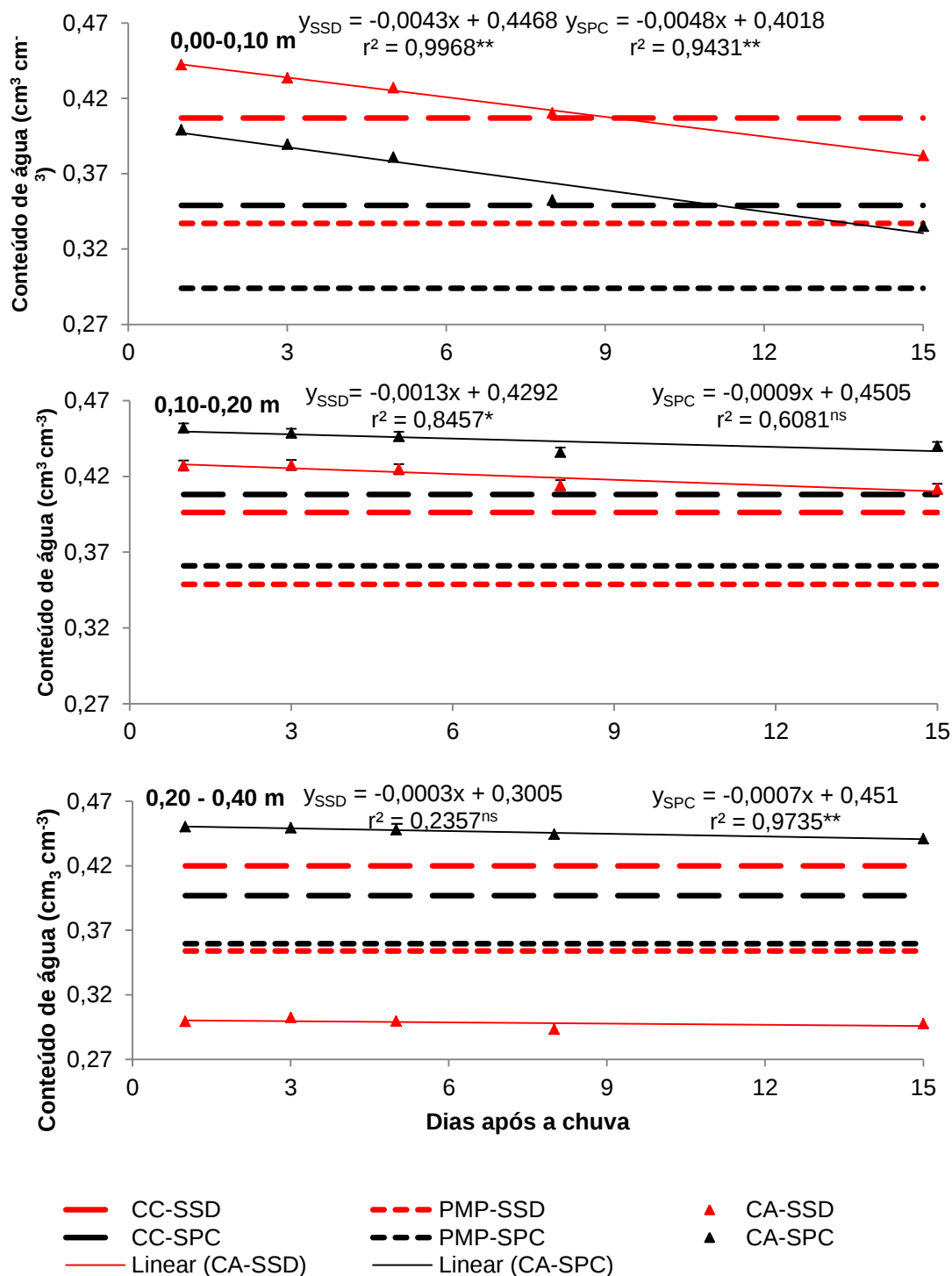


As médias foram comparadas pelo teste de Student (LSD) ao nível de 5% de probabilidade.

Segundo Santos et al. (2014), a infiltração de água no solo está correlacionada positivamente com a macroporosidade, ou seja, quanto maior a macroporosidade maior é a taxa de infiltração de água. Contudo, neste trabalho, em sistema de manejo já consolidado, a menor macroporosidade encontrada no SSD (Tabela 4), não influenciou na taxa de infiltração de água, pois apesar de apresentar menor macroporosidade que o SPC, o SSD teve maior taxa de infiltração acumulada. Isso pode ser atribuído a melhor continuidade dos poros em SSD, já que é comum neste sistema a camada superficial apresentar menor macroporosidade, porém com poros mais contínuos, refletindo assim na infiltração de água no solo (Galdos et al., 2019).

Os dados de água no solo em profundidade, avaliados em dias após a chuva e a significância da regressão, estão apresentados na Figura 2.

Figura 2 - Curva de secamento de água no solo em sistema de manejo consolidado. Botucatu-SP, 2019. ^{ns}: não significativo; * significativo a 5% e ** significativo a 1% de probabilidade pelo teste de regressão. CC: capacidade de campo; PMP: ponto de murcha permanente; CA: conteúdo de água no solo; SSD: sistema de semeadura direta; SPC: sistema de preparo convencional.



Na profundidade de 0,00-0,10 m, o CA no SSD até 8 DAC ficou acima do limite máximo de água disponível, e aos 15 DAC permaneceu dentro da faixa de disponibilidade de água (entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente); já o SPC armazenou água dentro da faixa de disponibilidade para às plantas, independentemente da quantidade de dias após a chuva. Todavia, o ponto de murcha permanente no SSD é de $0,337 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, enquanto que no SPC é mais baixa, $0,294 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, essa diferença de 12,76% pode ser um indicativo de possível vulnerabilidade do SSD em períodos de veranicos prolongados, porém, a capacidade de armazenamento do SSD é de 21,43% a mais que o SPC, desta forma, podendo suprir a necessidade de água pela planta em períodos de estiagem, já que consegue armazenar e disponibilizar maior quantidade de água às plantas.

Na profundidade de 0,10-0,20 m, o CA ficou acima da CC em ambos os sistemas de manejo, em todos os períodos de avaliação. E apesar da capacidade de armazenamento ser igual para os sistemas de manejo ($0,047 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), o valor crítico para absorção de água pelas plantas no SSD é menor ($0,349 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

Já na última profundidade avaliada (0,20-0,40 m), o SSD armazenou água abaixo do ponto de murcha permanente em todos os dias após a chuva, assim, apesar de ter água armazenada, esta não está disponível. Enquanto que o SPC manteve a água no solo disponível para absorção pelas plantas. Entretanto, a não disponibilidade de água nesta profundidade no SSD, possivelmente não afetou o desenvolvimento da planta, tendo em vista que 94,68% das raízes estavam entre 0,00-0,20 m de profundidade no solo (Tabela 3).

A baixa umidade no SSD nesta camada pode ser explicada pelo fato que o volume de chuva incidente nos 2 sistemas é o mesmo, só que no SSD há maior retenção pela palha e matéria orgânica do solo em superfície, já que a CC no SPD nessa camada é bem maior. Então grande parte do volume da chuva não chega a infiltrar no perfil.

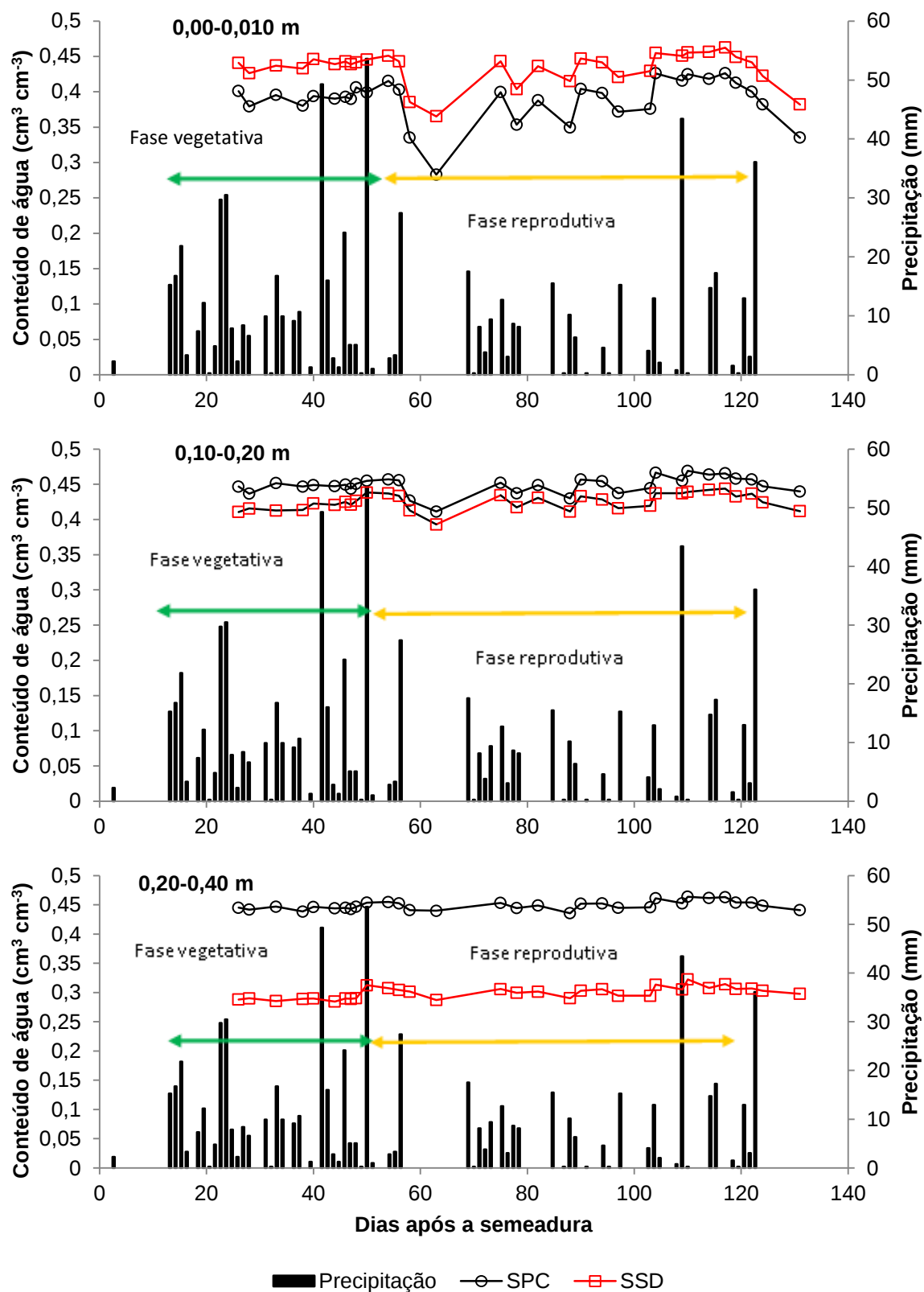
Considerando que no SPC há incorporação dos resíduos vegetais anualmente até a profundidade de 0,30 m, talvez, a maior disponibilidade de água na profundidade de 0,20-0,40 m, pode estar relacionada com o volume de mesoporos, uma vez que a matéria orgânica pode ter propiciado maior volume de mesoporos, conforme resultados obtidos por Campos et al. (2018).

Na camada de 0,00 a 0,10 m, o conteúdo de água armazenada logo após a chuva teve comportamento semelhante entre os manejos, porém com maior armazenamento no SSD (Figura 3).

Entretanto, após a chuva, o solo sob SPC secou mais rapidamente do que o solo sob SSD, indicando que, em períodos curtos de estiagem (53-65 e 117–132 dias após semeadura), o SSD proporciona maior oferta hídrica às raízes superficiais, o que está de acordo com os resultados de Martorano et al.(2009) e Ribeiro et al. (2016). Além disso, a melhor cobertura do solo proporcionada pelo SSD pode reduzir a perda de água para a atmosfera via evaporação (Odhiambo e Bomke, 2007), principalmente nas fases iniciais do cultivo, o que favoreceria seu armazenamento no solo. Vale ressaltar que este primeiro período de estiagem (53-65 DAS) foi no período de florescimento e formação dos grãos, período este de maior demanda hídrica da soja (Kuss et al., 2008).

Nas profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, o conteúdo de água armazenada ao longo do tempo foi maior no SPC, tendo maior contraste na última profundidade, com volume de água armazenada em torno de 33% superior que no SSD. Contudo, na profundidade de 0,00-0,10 e 0,20- 0,40 m o SPC apresenta maior velocidade de secamento (Figura 2), enquanto que o SSD, na camada superficial, conserva mais água provavelmente em função da palha.

Figura 3 - Variação da água armazenada e volume precipitado durante o ciclo de cultivo da soja, em sistema de preparo convencional (SPC) e sistema de semeadura direta (SSD), em diferentes profundidades no solo. Botucatu-SP, 2019.



Todavia, apesar dos sistemas terem influenciados as propriedades físicas do solo, a distribuição de raízes e a dinâmica da água no solo, não houve diferença entre a produtividade de soja (Tabela 5).

Tabela 5 - Produtividade de soja cultivada em sistema de manejo de longa duração. Botucatu-SP, 2019.

Manejo	Produtividade (kg ha ⁻¹)
SPC	4555 a
SSD	4326 a

Médias seguidas por letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Student (LSD) ao nível de 5% de probabilidade. SPD: sistema de preparo convencional; SSD: sistema de semeadura direta.

A produtividade apresentou alta correlação positiva com a macroporosidade e negativa com a microporosidade na profundidade de 0,10-0,20 m (Tabela 6). A redução de macroporosidade e aumento da microporosidade estão ligados à compactação do solo, por isso as correlações positivas e negativas com a produtividade. Além disso, a soja talvez mais que outras culturas, é muito dependente da macroporosidade, devido à necessidade de aeração para máxima nodulação e fixação biológica de N, a qual é muito dependente (Lanza et al., 2013; Justino e Sodek, 2013).

A maior macroporosidade possa ter promovido melhor infiltração de água no solo, ficando esta retida nos mesoporos, assim ficando mais facilmente disponível às plantas, devido a menor pressão de retenção, quando comparada aos microporos (Bianchi, 2004). A maior facilidade em absorver água proporciona um estado hídrico mais favorável às plantas em SSD, retardando o início do déficit hídrico em uma condição de estiagem, conforme observado por Bianchi et al. (2005 e 2007) e Damalgo et al. (2009).

Na profundidade de 0,00-0,10 m do solo foi possível observar que a MSR não teve correlação significativa com nenhuma das variáveis. Já na profundidade de 0,10-0,20 houve correlação positiva com a RP, e com IA. Contribuindo com os resultados encontrados no SSD, em que apesar de ter alta RSP não interferiu na massa de raiz e nem na infiltração total de água no solo.

Tabela 6 - Correlação entre as variáveis nas profundidades de 0,00-0,0-10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. Botucatu-SP, 2018.

	0,00-0,10 m								
	MSR	RP	PT	Mp	mp	Ds	CAD	PROD	IA
RP	0,431 ^{ns}								
PT	-0,195 ^{ns}	-0,786*							
Mp	0,013 ^{ns}	-0,828*	0,899**						
mp	-0,456 ^{ns}	0,143 ^{ns}	0,166 ^{ns}	-0,283 ^{ns}					
Ds	0,077 ^{ns}	0,704 ^{ns}	-0,670 ^{ns}	-0,741*	0,201 ^{ns}				
CAD	-0,333 ^{ns}	-0,905**	0,804*	0,882**	-0,255 ^{ns}	-0,835*			
PROD	-0,224 ^{ns}	-0,116 ^{ns}	-0,161 ^{ns}	-0,095 ^{ns}	-0,138 ^{ns}	-0,348 ^{ns}	0,208 ^{ns}		
IA	0,304 ^{ns}	0,850**	-0,689 ^{ns}	-0,785*	0,260 ^{ns}	0,785*	-0,938**	-0,475 ^{ns}	
AA	-0,349 ^{ns}	0,483 ^{ns}	0,605 ^{ns}	-0,807*	0,493 ^{ns}	0,437 ^{ns}	-0,562 ^{ns}	-0,006 ^{ns}	0,588 ^{ns}
	0,10-0,20 m								
RP	0,847**								
PT	-0,015 ^{ns}	0,231 ^{ns}							
Mp	-0,104 ^{ns}	-0,155 ^{ns}	0,236 ^{ns}						
mp	0,082 ^{ns}	-0,025 ^{ns}	0,497 ^{ns}	-0,725*					
Ds	0,451 ^{ns}	0,601 ^{ns}	-0,527 ^{ns}	-0,692 ^{ns}	0,244 ^{ns}				
CAD	-0,932**	-0,967**	0,159 ^{ns}	0,158 ^{ns}	-0,029 ^{ns}	-0,632 ^{ns}			
PROD	-0,291 ^{ns}	-0,143 ^{ns}	-0,087 ^{ns}	0,781*	-0,758*	-0,447 ^{ns}	0,208 ^{ns}		
IA	0,941**	0,888**	-0,158 ^{ns}	0,349 ^{ns}	0,199 ^{ns}	0,644 ^{ns}	-0,938**	-0,475 ^{ns}	
AA	-0,250 ^{ns}	-0,565 ^{ns}	-0,091 ^{ns}	-0,189 ^{ns}	0,104 ^{ns}	-0,079 ^{ns}	0,434 ^{ns}	-0,066 ^{ns}	-0,260 ^{ns}
	0,20-0,40 m								
RP	-0,641 ^{ns}								
PT	-0,366 ^{ns}	0,515 ^{ns}							
Mp	0,463 ^{ns}	0,444 ^{ns}	0,818*						
mp	0,100 ^{ns}	0,372 ^{ns}	0,771*	0,264 ^{ns}					
Ds	0,164 ^{ns}	0,326 ^{ns}	0,097 ^{ns}	-0,358 ^{ns}	0,559 ^{ns}				
CAD	0,893**	-0,299 ^{ns}	-0,199 ^{ns}	-0,429 ^{ns}	0,141 ^{ns}	0,169 ^{ns}			
PROD	-0,104 ^{ns}	-0,268 ^{ns}	-0,161 ^{ns}	-0,069 ^{ns}	-0,193 ^{ns}	0,197 ^{ns}	-0,208 ^{ns}		
IA	0,875**	-0,271 ^{ns}	-0,115 ^{ns}	-0,291 ^{ns}	0,129 ^{ns}	-0,070 ^{ns}	0,939**	-0,475 ^{ns}	
AA	0,516 ^{ns}	0,224 ^{ns}	0,563 ^{ns}	0,886**	-0,036 ^{ns}	-0,586 ^{ns}	-0,638 ^{ns}	-0,096 ^{ns}	-0,455 ^{ns}

^{ns} não significativo, **significativo a 1% e *significativo a 5% pela análise de correlação de Pearson.

Nesta profundidade, a MSR também correlacionou com a CAD, porém negativamente. A maior quantidade de raiz pode reduzir o CAD por haver maior absorção (demanda) de água. Ocorre maior perda por evapotranspiração. Na profundidade de 0,20-0,40 m, apresentou correlação positiva com a CAD e com a IA, podendo ser um indicativo de formação de bioporos em profundidade, facilitando a infiltração de água e a capacidade do solo em armazená-la.

A RP correlacionou negativamente com a PT, MP e a CAD na profundidade de 0,00-0,10 m. Se há maior resistência mecânica do solo à penetração das raízes, é esperado que este solo tenha menos espaço poroso (PT e Mp), resultando em menor capacidade para armazenamento de água (CAD). Na profundidade de 0,10-0,20 também houve correlação negativa com a CAD, confirmando os resultados encontrados na profundidade anterior, em que quanto mais compactado o solo, menor é a capacidade de armazenamento de água. Contudo, nestas profundidades também houve correlação positiva da RP com a IA, isso indica que apesar do solo ter a CAD reduzida pela compactação, não influenciou na capacidade de infiltração de água no solo, porém a água infiltrada não fica disponível para as plantas.

A PT apresentou correlação significativa com a Mp e a CAD na profundidade de 0,00-0,10 m e com a Mp e a mp na camada de 0,20-0,40 m. A PT é a soma da Mp e da mp do solo, então, com aumento da PT é esperado que pelo menos uma destas propriedades aumente também. Aumentando estas características, é esperado também que aumente a CAD, já que a Mp está relacionada com a infiltração de água e a mp com a retenção no solo.

A redução da Mp é um indicativo de compactação do solo, já que aumenta a densidade do solo, esta correlação pôde ser observada neste trabalho na profundidade de 0,00-0,10 m. Nesta mesma camada foi possível observar correlação negativa da Mp com a IA, o que pode estar relacionado com a qualidade e continuidade dos poros e não com a quantidade, já que se trata de um sistema de manejo de longa duração (32 anos). Houve correlação negativa também com a AA, pois a água armazenada nos Mp está retida com menor força de retenção, ficando mais facilmente susceptível a perda (Bianchi, 2004). Na profundidade de 0,10-0,20 m foi observado correlação negativa da Mp com a mp, pois se aumenta a macroporosidade é esperado que diminua a microporosidade e, por conseguinte, a AA. Na profundidade de 0,20-0,40 m a Mp apresentou correlação positiva apenas com a AA.

A mp, na profundidade de 0,10-0,20 m, apresentou correlação negativa apenas com a produtividade. O aumento da microporosidade é indicativo de aumento da compactação do solo, podendo ser este o fator da redução da produtividade da soja, já que este fator afeta diretamente a produção das culturas (Valadão et al., 2017).

A Ds apresentou correlação na profundidade inicial, sendo negativa com a CAD e positiva com a IA. Um solo com alta densidade apresenta pouco espaço poroso, e isso influencia diretamente a capacidade do solo em armazenar água. Contudo, era esperado que a maior densidade resultasse em menor IA, o que não foi observado neste trabalho.

Na profundidade de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m a CAD teve correlação negativa com a IA. Nestas mesmas profundidades também houve correlação negativa da RP com a CAD, desta forma como o solo estava mais compactado, consequentemente com menos espaço poroso, possa ser que apesar da água conseguir infiltrar nos primeiros 0,20 cm do solo, não foi possível armazená-la. Já na camada de 0,20-0,40 cm, quanto maior a CAD, maior foi a IA.

1.3.2 Experimento II

Os valores de resistência do solo à penetração (RP) e da capacidade máxima de água disponível (CAD) apresentaram interação significativa entre os sistemas de manejo de primavera (milheto, crotalária e escarificação do solo a cada três anos) e a profundidade do solo (Tabela 7).

Desdobrando a interação entre os manejos e a profundidade do solo para RP, observou-se que a escarificação apresentou os menores valores. Nicoloso et al. (2008) e Moraes (2013) apontam que o efeito da escarificação sobre a resistência mecânica do solo à penetração das raízes e sobre os demais atributos físicos do solo são temporários, não superior a um ano, porém os resultados deste trabalho apontam para um menor estado de compactação com a escarificação, quando comparado com os demais tratamentos envolvendo o uso de plantas de cobertura. Calonego (2007), nesta mesma área, também encontrou menores valores de RP no tratamento com escarificação, enquanto que a utilização de plantas de cobertura (milheto e crotalária) proporcionou resultados semelhantes após o terceiro ano de cultivo.

Tabela 7 - Valores de resistência do solo à penetração (RP) e capacidade máxima de água disponível (CAD) em sistema de manejo de longa duração nas profundidades de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. Botucatu-SP, 2019.

Manejo	RP (MPa)		
	Profundidade (m)		
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40
Milheto	4,57 abC	8,29 aA	6,20 aB
Crotalária	5,47 aB	7,63 aA	5,92 aB
Escarificação	3,55 bA	4,25 bA	3,71 bA
	CAD (cm ³ cm ⁻³)		
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40
Milheto	0,055 cC	0,060 aB	0,070 aA
Crotalária	0,060 bA	0,060 aA	0,050 bB
Escarificação	0,065 aA	0,060 aB	0,050 bC

Médias seguidas por letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Student (LSD) ao nível de 5% de probabilidade.

Nos sistemas sem mobilização do solo (milheto e crotalária), os maiores valores de RP do solo foram encontrados na profundidade de 0-10 m; enquanto que o manejo com escarificação não apresentou diferença na RP entre as profundidades analisadas. Valores altos de RP podem afetar o desenvolvimento do sistema radicular, interferindo na absorção de água pelas plantas (Tavares Filho et al., 2001; Taiz e Zeiger, 2013), e desta forma interferindo negativamente na produtividade da cultura.

Quanto à capacidade de armazenamento de água do solo (CAD), a profundidade intermediária (0,10-0,20 m) apresentou maior constância em todos os sistemas de manejo de primavera. O milheto na profundidade de 0,00-0,10 m apresentou menor CAD que os demais tratamentos, contudo, ao avaliar sua CAD na camada de 0,20-0,40 m, foi possível perceber um aumento na capacidade de armazenamento de 40% em relação à crotalária e a escarificação. Isso, em situações de veranico e déficit hídrico para as plantas, pode favorecer vantagem ao desenvolvimento, tendo em vista que a planta pode estimular o crescimento das raízes em profundidade e ter acesso a possível água armazenada nesta profundidade.

Os valores de massa seca de raiz (MSR), porosidade total (PT), macroporosidade (MP), microporosidade (mp) e densidade do solo (Ds) não apresentaram interação significativa entre os fatores analisados, todavia, houve diferença entre os fatores isolados (Tabela 8).

A Mp não foi influenciada pelos manejos de primavera. Já entre as profundidades houve diferença entre as camadas superficiais (0,00-0,10 e 0,10-0,20 m) com a camada de 0,20-0,40 m, sendo a menor Mp encontrada em maior profundidade. Entretanto, exceto a camada de 0,00-0,10 m não apresentou valores críticos de porosidade de aeração para culturas anuais (Grable e Siemer, 1968), as demais profundidades tiveram valores inferiores a $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Tabela 8 - Valores de massa seca de raiz (MSR), porosidade total (PT), macroporosidade (MP), microporosidade (mp) e densidade do solo (Ds) em sistema de manejo de longa duração nas profundidades de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. Botucatu-SP, 2019.

Manejo	Mp	mp	PT	Ds	MSR
		$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$		g cm^{-3}	kg ha^{-1}
Milheto	0,06 a	0,42 a	0,48 b	1,35 a	5357 a
Crotalária	0,07 a	0,42 a	0,50 ab	1,36 a	5322 a
Escarificação	0,10 a	0,41 a	0,51 a	1,34 a	5448 a
Profundidade	Mp	mp	PT	Ds	MSR
m		$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$		g cm^{-3}	kg ha^{-1}
0,00-0,10	0,10 a	0,42 a	0,52 a	1,37 a	6124 a
0,10-0,20	0,09 a	0,40 a	0,49 b	1,37 a	4891 b
0,20-0,40	0,05 b	0,44 a	0,49 b	1,31 a	5113 b

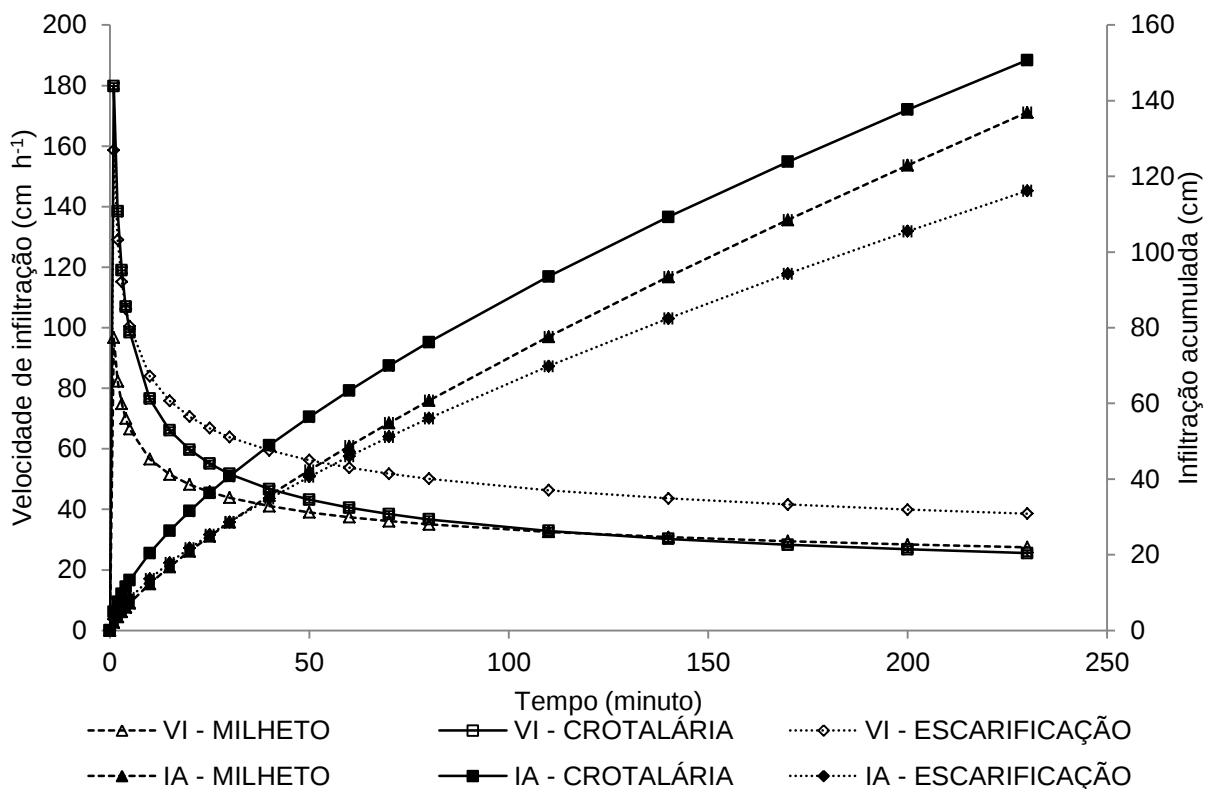
Médias seguidas por letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Student (LSD) ao nível de 5% de probabilidade.

A mp e a Ds não foram influenciadas por nenhum dos fatores estudados. Os manejos se diferiram quanto a PT, sendo o manejo com escarificação superior ao milheto. Quanto à profundidade, houve maior PT na camada de 0,00-10 m. Resultados semelhantes foram encontrados por Rigon (2013).

A MSR não foi influenciada pelos manejos estudados, mas apenas pelas profundidades. Na camada de 0,00-0,10 m foi encontrada a maior MSR, correspondendo a 37,93% da massa seca total de raízes. A maior produção de MSR pode estar relacionada aos menores valores de RP encontrados nesta profundidade (Tabela 5), associados aos valores de Mp e PT (Tabela 8), indicando menor índice de compactação e favorecendo o desenvolvimento radicular.

Ao avaliar a velocidade de infiltração de água de no solo (VI) e a infiltração acumulada (IA), foi possível notar que não houve diferença nestas variáveis entre os tratamentos em todos os tempos de avaliação (Figura 4).

Figura 4 - Velocidade de infiltração (VI) e infiltração acumulada (IA) de água no solo em sistema com rotação de cultura com milho, crotalária e escarificação do solo. Botucatu-SP, 2019.



As médias foram comparadas pelo teste de Student (LSD) ao nível de 5% de probabilidade.

A velocidade de infiltração básica no milho foi de $27,5 \text{ cm h}^{-1}$, na crotalária de $25,54 \text{ cm h}^{-1}$ e no tratamento com escarificação foi de $20,98 \text{ cm h}^{-1}$, o que segundo Bernardo et al. (2006) pode ser classificada como alta. Portanto, apesar de não ter apresentado diferença entre os tratamentos na VI e na IA, pôde-se perceber que o não revolvimento do solo (milho e crotalária) não prejudicou a infiltração de água no solo, podendo este benefício ser atribuído à formação de bioporos contínuos no solo promovido pelo crescimento das raízes ao longo do perfil. Vale ressaltar também, que a maior RSP e menor PT encontrada nos tratamentos com cultivo de plantas na primavera também não influenciou a VI e a IA nas condições em que foi conduzido este experimento.

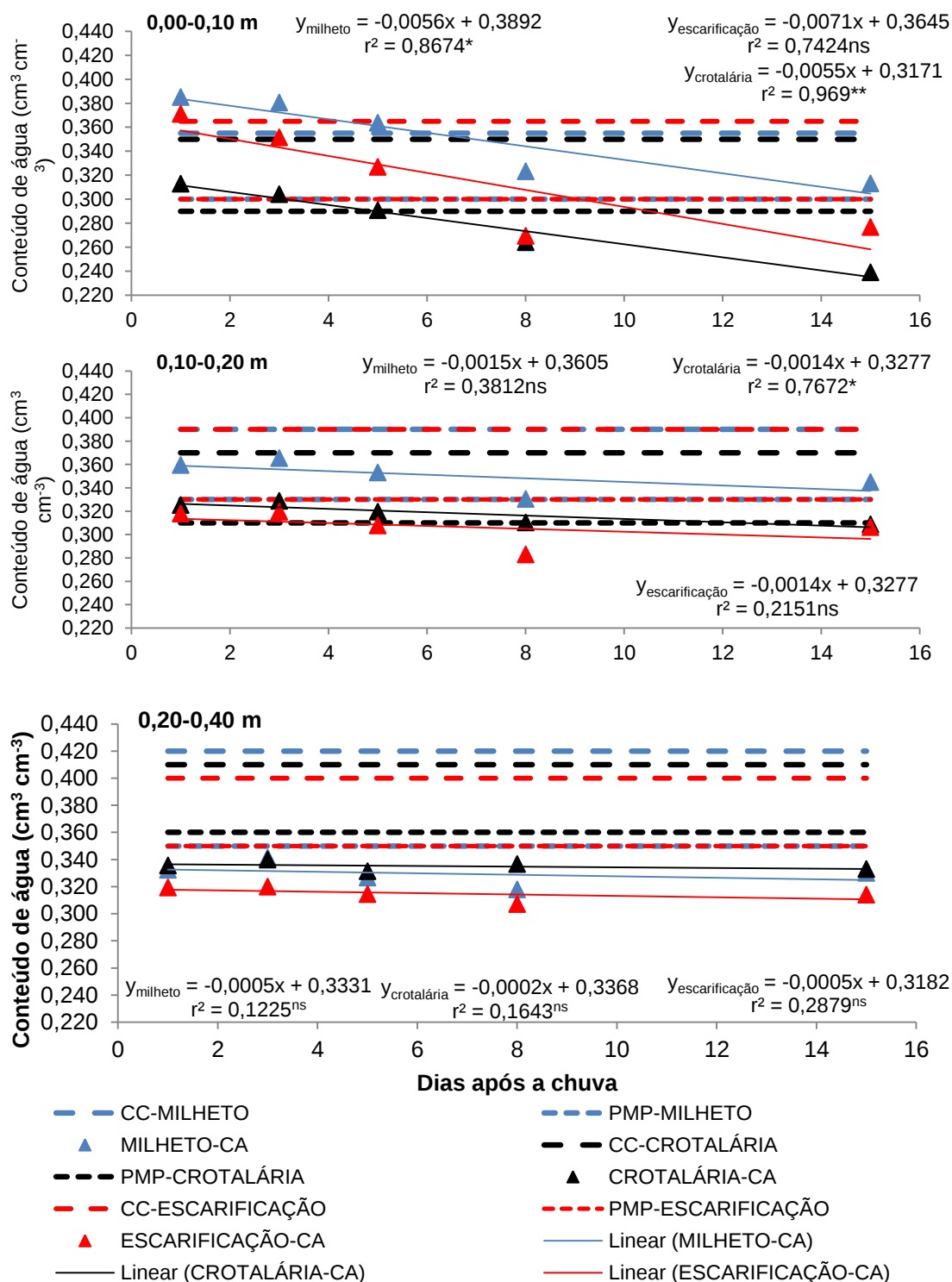
Entretanto, ao avaliar o armazenamento de água no solo em profundidade, notou-se diferença no conteúdo de água. Estes dados, avaliados em dias após a chuva e a significância da regressão, estão apresentados na Figura 5.

Na profundidade de 0,00-0,10 m o tratamento com milho armazenou água dentro da faixa de disponibilidade à planta em todos os dias de avaliação após a chuva, porém com capacidade menor que os demais tratamentos. Já os manejos com crotalaria e escarificação não apresentaram água disponível aos 8 e 15 dias após a chuva, assim mostrando-se mais susceptível a períodos de estiagem.

Na profundidade de 0,10-0,20 m, apesar dos tratamentos apresentarem capacidade de armazenamento igual, não apresentou capacidade de retenção semelhante. A rotação com milho foi capaz de armazenar água dentro da faixa de disponibilidade até 15 dias após a chuva, enquanto que o tratamento com crotalaria até 8 dias, e a escarificação não reteve água na faixa de disponibilidade em nenhum dos dias, ficando todos abaixo do ponto de murcha permanente.

Na camada de 0,20-0,40 m, nenhum dos tratamentos armazenou água na faixa de disponibilidade às plantas, no entanto, vale ressaltar, que o milho apresentou maior CAD nesta profundidade (Tabela 7).

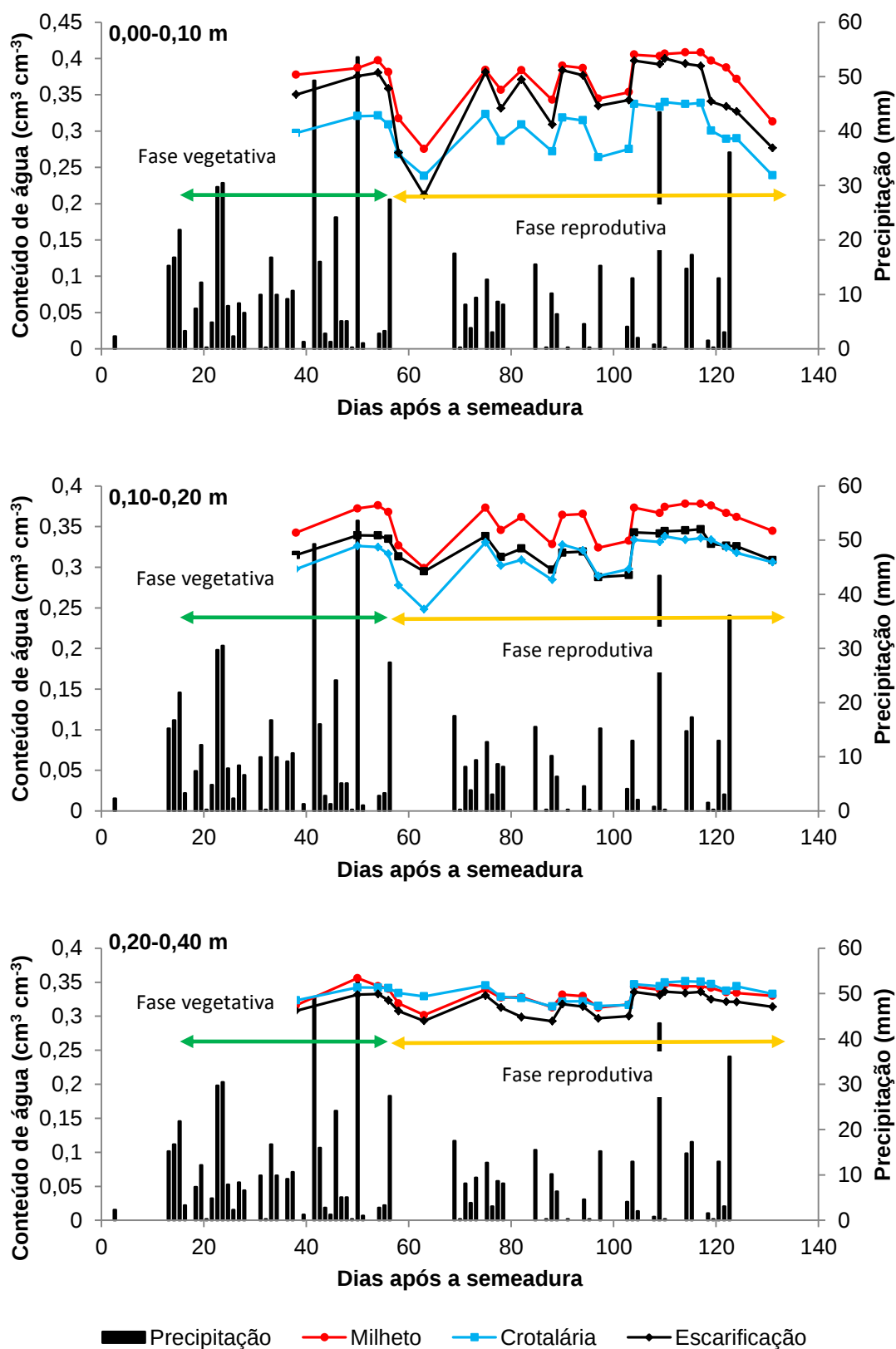
Figura 5 - Curva de secamento de água no solo em sistema de manejo consolidado. Botucatu-SP, 2019. ^{ns}: não significativo; * significativo a 5% e ** significativo a 1% de probabilidade pelo teste de regressão. CC: capacidade de campo; PMP: ponto de murcha permanente; CA: conteúdo de água no solo.



Analisando todas as profundidades, foi possível observar que o tratamento com escarificação a cada três anos, apesar de ter apresentado menor RP (Tabela 7) e maior PT (Tabela 8), não foi capaz de armazenar água para as plantas entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. É possível que com a movimentação do solo, haja a quebra da continuidade dos poros, prejudicando a infiltração e o armazenamento de água no solo. Galdos et al. (2019), avaliando a porosidade de solos sob semeadura direta e preparo convencional do solo, em área com 32 anos de manejo, encontraram menor continuidade de poros em sistema com revolvimento do solo. Além disso, foi possível notar que o milheto foi o tratamento com maior constância no armazenamento de água e com maior CAD total ($0,185 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

Ao comparar o armazenamento de água com a precipitação, foi observado comportamento semelhante entre os tratamentos em todas as profundidades (Figura 6). Contudo, a rotação com milheto apresentou maior estabilidade no conteúdo de água armazenada. Enquanto que os tratamentos com crotalária e escarificação mostraram-se mais susceptível quanto ao conteúdo de água armazenada em períodos de estiagem (53-65 e 117-132 dias após semeadura), principalmente na profundidade de 0,20-0,40 m.

Figura 6 - Variação da água armazenada, e volume precipitado durante o ciclo de cultivo da soja, em diferentes profundidades do solo. Botucatu-SP, 2019.



Houve diferença significativa na produtividade da soja entre os tratamentos de primavera (Tabela 9).

Tabela 9 - Produtividade de soja cultivada em sistema de manejo de longa duração. Botucatu-SP, 2019.

Manejo	Produtividade (kg ha ⁻¹)
Milheto	1899 a
Crotalária	1675 b
Escarificação	1547 c

Médias seguidas por letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Student (LSD) ao nível de 5% de probabilidade.

A rotação com milheto foi a que promoveu melhores respostas produtivas das plantas de soja, corroborando com os dados de armazenamento e disponibilidade de água no solo (Figura 5 e 6), já que o milheto foi o tratamento que apresentou menor vulnerabilidade à seca em períodos de estiagem, conforme foi observado neste trabalho na fase reprodutiva da cultura (53-65 e 117–132 dias após semeadura).

Tal resultado também pode ser explicado pela correlação positiva entre a produtividade e porosidade total do solo na camada de 0,20 a 0,40 m (Tabela 10). Esta correlação indica que quanto mais poroso o solo melhor foi a produtividade das plantas neste experimento. Todavia a produtividade não correlacionou com nenhuma outra variável, independente da profundidade.

Porém, a PT teve correlação positiva com a CAD até a profundidade de 0,20 m; e com a IA na profundidade de 0,00 a 0,10 m, assim pode inferir que como teve maior porosidade, houve maior espaço no solo para infiltração, armazenamento e retenção de água às plantas, resultando em melhor produção.

Tabela 10 - Correlação entre as variáveis nas profundidades de 0,00-0,0-10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. Botucatu-SP, 2018.

	0,00-0,10 m								
	MSR	RP	PT	Mp	mp	Ds	CAD	PROD	IA
RP	-0,151 ^{ns}								
PT	-0,058 ^{ns}	-0,132 ^{ns}							
Mp	-0,354 ^{ns}	-0,190 ^{ns}	0,769 ^{**}						
mp	0,558 ^{ns}	0,177 ^{ns}	-0,370 ^{ns}	-0,879 ^{**}					
Ds	0,365 ^{ns}	-0,058 ^{ns}	-0,497 ^{ns}	-0,776 ^{**}	0,756 ^{**}				
CAD	-0,350 ^{ns}	-0,386 ^{ns}	0,664 [*]	0,655 [*]	-0,456 ^{ns}	-0,274 ^{ns}			
PROD	-0,515 ^{ns}	0,504 ^{ns}	0,196 ^{ns}	0,292 ^{ns}	-0,279 ^{ns}	-0,256 ^{ns}	0,436 ^{ns}		
IA	0,071 ^{ns}	0,289 ^{ns}	0,701 [*]	0,548 ^{ns}	-0,272 ^{ns}	-0,152 ^{ns}	0,820 ^{**}	0,253 ^{ns}	
AA	0,075 ^{ns}	0,117 ^{ns}	-0,019 ^{ns}	0,287 ^{ns}	-0,431 ^{ns}	-0,570 ^{ns}	-0,222 ^{ns}	0,203 ^{ns}	-0,197 ^{ns}
	0,10-0,20 m								
RP	-0,492 ^{ns}								
PT	-0,015 ^{ns}	-0,694 [*]							
Mp	0,364 ^{ns}	-0,375 ^{ns}	0,274 ^{ns}						
mp	-0,365 ^{ns}	-0,057 ^{ns}	0,342 ^{ns}	-0,810 ^{**}					
Ds	0,434 ^{ns}	0,158 ^{ns}	-0,621 [*]	-0,465 ^{ns}	0,075 ^{ns}				
CAD	0,659 [*]	-0,847 ^{**}	0,612 [*]	0,395 ^{ns}	-0,013 ^{ns}	-0,080 ^{ns}			
PROD	-0,111 ^{ns}	-0,272 ^{ns}	0,402 ^{ns}	-0,323 ^{ns}	0,561 ^{ns}	0,057 ^{ns}	0,115 ^{ns}		
IA	0,453 ^{ns}	-0,590 [*]	0,124 ^{ns}	0,170 ^{ns}	-0,091 ^{ns}	0,087 ^{ns}	0,467 ^{ns}	0,253 ^{ns}	
AA	0,039 ^{ns}	0,119 ^{ns}	-0,220 ^{ns}	-0,257 ^{ns}	0,117 ^{ns}	0,292 ^{ns}	-0,339	0,061 ^{ns}	-0,164 ^{ns}
	0,20-0,40 m								
RP	-0,421 ^{ns}								
PT	-0,184 ^{ns}	-0,079 ^{ns}							
Mp	0,092 ^{ns}	0,074 ^{ns}	0,277 ^{ns}						
mp	-0,228 ^{ns}	-0,128 ^{ns}	0,582 [*]	-0,620 [*]					
Ds	0,322 ^{ns}	-0,028 ^{ns}	-0,214 ^{ns}	-0,517 ^{ns}	0,263 ^{ns}				
CAD	-0,231 ^{ns}	0,496 ^{ns}	-0,203 ^{ns}	-0,326 ^{ns}	0,111 ^{ns}	-0,143 ^{ns}			
PROD	0,096 ^{ns}	-0,005 ^{ns}	0,628 [*]	0,522 ^{ns}	0,071 ^{ns}	-0,108 ^{ns}	0,458 ^{ns}		
IA	0,261 ^{ns}	-0,479 ^{ns}	0,234 ^{ns}	0,163 ^{ns}	0,054 ^{ns}	0,338 ^{ns}	-0,848 ^{ns}	0,253 ^{ns}	
AA	0,177 ^{ns}	-0,021 ^{ns}	0,300 ^{ns}	0,235 ^{ns}	0,046 ^{ns}	-0,386 ^{ns}	0,021 ^{ns}	-0,026 ^{ns}	-0,054 ^{ns}

^{ns} não significativo, ^{**}significativo a 1% e ^{*}significativo a 5% pela análise de correlação de Pearson.

Houve correlação negativa entre a M_p e a m_p nas profundidades de 0,00 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m. Normalmente solos com baixa m_p , resulta em menor retenção de água para as plantas. A razão entre macro e microporosidade é um indicador sensível de compactação do solo, seus valores indicam o quanto de macroporos está sendo alterado em relação ao volume de microporos. Quando o volume de microporos é maior, há vantagem em relação à retenção de água, contudo, há perda de aeração e circulação de gases, aspectos que caracterizam a compactação e perda da qualidade física do solo (Rossetti e Centurion, 2013).

Na primeira camada avaliada (0,00-0,10 m) a macroporosidade também se correlacionou com a PT (0,77) e Ds (0,78), indicando que quanto maior a PT maior a M_p e a Ds. Valores altos de Ds indicam estado de compactação do solo, considerando a correlação entre a M_p e m_p , era esperado tal resultado, já que a redução da microporosidade também é um indicativo de compactação do solo. Tal fato pode ser observado na correlação entre a Ds e a m_p nesta mesma profundidade.

Houve também correlação positiva entre a CAD e a M_p e a CAD e a IA. Esta correlação pode ser explicada pelo fato que a macroporosidade é responsável principalmente pela aeração e infiltração de água no solo, assim favorecendo a entrada e armazenamento de água no solo.

Na profundidade intermediária (0,10-0,20 m) a RP correlacionou negativamente com a PT, CAD e IA; a PT com a Ds (-0,62); e a CAD com MSR (0,66). Tal resultado já era esperado, tendo em vista que altos valores de RP e Ds estão associados a menor PT, resultando em menor CAD e infiltração de água.

Na profundidade de 0,20-0,40 m a m_p apresentou correlação positiva com a PT. A PT é a soma da M_p e da m_p do solo, então, com aumento da PT é esperado que pelo menos uma destas propriedades aumente também.

1.4 CONCLUSÕES

As propriedades físicas do solo são influenciadas pelos sistemas de manejo envolvendo semeadura direta e preparo convencional e pelas rotações com milho, crotalaria e escarificação, interferindo na dinâmica da água no solo e na produtividade da cultura da soja.

Os sistemas de manejo de longa duração sem revolvimento do solo oferecem menor risco ao déficit hídrico às plantas de soja.

A produtividade da soja não é alterada em função do sistema de preparo convencional e semeadura direta de longa duração (32 anos).

A rotação com milho na safra de primavera proporciona menor vulnerabilidade à seca e melhor produtividade da soja

REFERÊNCIAS

- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n. 3, p.519-531, 2004.
- BAMBERG, A. L.; PAULETTO, E. A.; GOMES, A. da S.; TIMM, L. C.; PINTO, L. F. S.; LIMA, A. C. R. de; SILVA, T. R. da. Densidade de um Planossolo sob sistemas de cultivo avaliada por meio da tomografia computadorizada de raios gama. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n. 5, p.1079-1086, 2009.
- BARBOSA, J. C.; MALDONADO JUNIOR, W. **Agrostat**: Sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos. Versão 1.0. Jaboticabal: Departamento de Ciências Exatas, 2010.
- BAUMHARDT, R. L.; JONES, O. R. Residue management and tillage effects on soil water storage and grain yield of dryland wheat and sorghum for a clay loam in Texas. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.68, n. 2, p.71-82, 2002.
- BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Física de solos**. Piracicaba: Instituto da Potafos, 1982. 529 p
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. Ed. Atual. e Ampliada. Viçosa: UFV, 2006. 625p.
- BESCANSÀ, P.; IMAZ, M. J.; VIRTO, I.; ENRIQUE, A.; HOOGMOED, W. B. Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.87, n. 1, p.19-27, 2006.
- BIANCHI, C. A. M. **Avaliação de indicadores da condição hídrica em milho sob diferentes níveis de água, em semeadura direta e convencional**. 2004. Dissertação (Mestrado em fitotecnia) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre, 2004.
- BIANCHI, C. A. M.; BERGONCI, J. I.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; HECKLER, B. M. M.; COMIRAN, F. Condutância da folha em milho cultivado em plantio direto e convencional em diferentes disponibilidades hídricas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.2, p.315-332, 2007.
- BIANCHI, C. A. M.; BERGONCI, J. I.; BERGAMASCHI, .; DAMALGO, G. A. Ajuste osmótico em milho cultivado em diferentes sistemas de manejo de solo e disponibilidade hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.7, p.645-651, 2005.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2ª ed. Madison: America Society of Agronomy, 1986. p. 363-375.

CALONEGO, J. C. **Uso de plantas de cobertura na recuperação de solo compactado**. 2007. Tese (Doutorado em Agronomia: Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

CAMPOS, S. A.; SOUZA, C. M.; GALVÃO, J. C. C.; NEVES, J. C. L. Atributos químicos e físicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico sob plantio direto. **Revista Agrarian**, Dourados, v.11, n.41, p. 230-240, 2018.

CRUZ, A. C. R.; PAULETTO, E. A.; FLORES, C. A.; SILVA, J. B. Atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n. 6, p.1105-1112, 2003.

DAMALGO, G. A.; BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I.; KRÜGER, C. A. M. B.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, (Suplemento), p.855–864, 2009.

DRURY, C. F.; TAN, C.; WELACKY, T. W.; OLOYA, T. O.; HAMILL, A. S.; WEAVER, S. E. Red clover and tillage influence on soil temperature, water content, and corn emergence. **Agronomy Journal**, Madison, v.91, p.101-108, 1999.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Pesquisa do Solo. **Manual de métodos de análises de solo**. Brasília, DF, 2017. 573 p.

ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SORAES, J. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, Reino Unido, v.86, n. 3, p.299-309, 2009.

FRANCHINI, J. C.; COSTA, J. M.; DEBIASI, H.; TORRES, E. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 52 p. (Embrapa Soja. Documentos, 327).

GALDOS, M. V.; PIRES, L. F.; COOPER, H. V.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A.; MOONEY, S. J. Assessing the long-term effects of zero-tillage on the macroporosity of Brazilian soils using X-ray Computed Tomography. **Geoderma**, Amsterdam, v. 337, p. 1126-1135, 2019.

GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 32, n. 2, p. 180-186, 1968.

HATFIELD, J. L.; SAUER, T. J.; PRUEGER, J. H. Managing soils to achieve greater water use efficiency: a review. **Agronomy Journal**, v.93, p.271-280, 2001.

HUBERT, F.; HALLAIRE, V.; SARDINI, P.; CANER, L.; HEDDADJ, D. Pore morphology changes under tillage and no-tillage practices. **Geoderma**, Amsterdam, v.142, n. 1-2, p.226-236, 2007.

JORGE, R. F.; ALMEIDA, C. X.; BORGES, E. N.; PASSOS, R. R. Distribuição de poros e densidade de Latossolos submetidos a diferentes sistemas de uso e manejo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, suplemento 1, p. 159-169, 2012.

JUSTINO, G. C.; SODEK, L. Recovery of nitrogen fixation after short-term flooding of the nodulated root system of soybean. **Journal of Plant Physiology**, Amsterdam, v.170, n. 3, p.235-241, 2013.

KUSS, R. C. P.; KÖNIG, O.; DUTRA, L. M. C.; BELLÉ, R. A.; ROGGIA, S.; STURMER, G. R. Populações de plantas e estratégias de manejo de irrigação na cultura da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.4, p. 1133-1137, 2008.

LAMPURLANÉS, J.; ANGÁS, P.; CANTERO-MARTÍNEZ, C. Root growth, soil content and yield of barley under different tillage systems on two soils in semiarid conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.69, n. 1, p.27-40, 2001.

LANZA, L.N.M.; ROSSI, S.C.; SODEK, L. Adubação nitrogenada beneficia soja alagada. **Bragantia**, Campinas, v.72, n. 1, p.2-9, 2013.

LIMA, A.C.R.; HOOGMOED, W.; PAULETTO, E.A.; PINTO, L.F.S. Management systems in irrigated rice affect physical and chemical soil properties. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.103, n. 1, p.9297, 2009.

LIMA, V. C.; LIMA, J. M. J. C. **Introdução à pedologia**. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, Dep. de Solos e Engenharia Agrícola, 2009.

MARTORANO, L. G.; BERGAMASCHI, H.; DAMALGO, G. A.; FARIA, R. T.; MIELNICZUK, J.; COMIRAN, F. Indicadores da condição hídrica do solo com soja em plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.4, p.397–405, 2009.

MENDONÇA, L. A. R.; VÁSQUEZ, M. A. N.; FEITOSA, J. V.; OLIVEIRA, J. F. de; FRANCA, R. M. de; VÁSQUEZ, E. M. F.; FRISCHKORN, H. Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. **Engenharia Sanitária Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 14, n 1, p. 89-98, 2009.

MINITAB. **Minitab 16**. 2018.

MORAES, M. T. **Qualidade física do solo sob diferentes tempos de adoção e de escarificação do sistema de plantio direto e sua relação com a rotação de cultura**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

MUNARETO, J. D.; BEUTLER, A. N.; RAMÃO, C. J.; DIAS, N. P.; RAMOS, P. V.; POZZEBON, B. C.; ALBERTO, C. M.; HERNANDES, G. C. Propriedades físicas do

solo e produtividade de arroz irrigado por inundação no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n. 12, p.1499-1506, 2010.

NICOLOSO, R. S.; AMADO, T. J. C.; SCHNEIDER, S.; LANZANOVA, M. E.; GIRARDELLO, V. C.; BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1735-1742, 2008.

ODHIAMBO, J. J. O.; BOMKE, A. A. Cover crop effects on spring soil water content and the implications for cover crop management in south coastal British Columbia. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.88, n 1-3, p.92-98, 2007.

OSUNBITAN, J. A.; OYEDELE, D. J.; ADEKALU, K. O. Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigéria. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.82, n 1, p.57-64, 2005.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S.; HOLANDA, F. S. R.; CRUVINEL, P. E.; VAZ, C. M. P. Evaluation of bulk density of Albaqualf soil under different tillage systems using the volumetric ring and computerized tomography methods. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 80, n. 1-2, p. 115-123, 2005.

REEVE, M. J.; CARTER A. D. Water release characteristic. In: SMITH K.A. et al. **Soil analysis: physical methods**. New York: Marcel Dekker, 1991. p.111-160.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M., eds. **Tópicos Ciência do Solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 5, p.49-134.

RIBEIRO, P. L.; BAMBERG, A. L.; REIS, D. A.; OLIVEIRA, A. C. B. de. Condições físico-hídricas de Planossolo cultivado com soja em plantio direto e preparo convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n 9, p. 1484-1491, 2016.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O.R.; LLANILLO, R.F. & FERREIRA, R. Compactação do solo: Causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n 3, p. 321-344, 2005.

RIGON, J. P. G. **Emissão de gases de efeito estufa em áreas de sistema semeadura direta com aportes diferenciados de carbono e nitrogênio**. 2013. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2013.

ROSSETTI, K. V.; CENTURION, J. F. Sistemas de manejo e atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho cultivado com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande v.17, n. 5, p.472-479, 2013.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho-escuro de Eldorado do Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, n. 2, p. 313-2319, 1995.

SANTOS, K. F. **Determinação de atributos físicos e do carbono orgânico do solo em diferentes tipos de uso da terra no planalto sul catarinense**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Centro de Ciências Agroveteinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2014.

SECCO, D.; ROS, C. O. DA; SECCO, J. K.; FIORIN, J. E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho Argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 407-414, 2005.

SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. **Soil analysis: Physical methods**. Marcel Dekker, Inc., New York. 1991.

SOBRINHO, T. A.; VITORINO, A. C. T.; SOUZA, L.C. F.; GONÇALVES, M. C.; CARVALHO, D. F. de. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 191-196, 2003.

STOLF, R. **Operação do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf**. Piracicaba: IAA/PLANALSUCAR., 1984. 8p. (Série Penetrômetro de Impacto. Boletim n.2).

STOLF, R.; MURAKAMI, J.H.; BRUGNARO, C.; SILVA, L. G.; SILVA, L. C. F.; MARGARIDO, L.A.C. Penetrômetro de impacto Stolf - programa computacional de dados em EXCEL-VBA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 3, p.774-782, 2014.

STONE L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 395-401, 2001.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Editora: Artmed, 2013. 954 p.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Resistência do solo a penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 3, v. 25, p. 725-730, 2001.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciado por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 301-309, 1998.

TORMENA, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; GONÇALVES, A. C. A.; ARAÚJO, M. A.; PINTO, J. C. Influência de diferentes sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 65-71, 2004.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1999. 58p. (Circular técnica, 23).

VALADÃO, F. C. A.; WEBER, O. L. S.; VALADÃO JÚNIOR, D. D.; SCAPINELLI, A.; DEINA, F. R.; BIANCHINI, A. Adubação fosfatada e compactação do solo: sistema radicular da soja e do milho e atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 4, p. 243-255, 2015.

VALENTE, G. F.; SILVA, V. F. A.; SILVA, J. N.; PINTO, D. R. S.; GALVÃO, J. R. Resistência mecânica à penetração em sistemas de manejo do solo. **Revista Verde**, Santa Maria, v. 14, n. 1, p. 140-145, 2019.

VITA, P. de; PAOLO, E. D.; FECONDO, G.; FONZO, N. D.; PISANTE, M. No-tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in southern Italy. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, n. 1-2, p. 69-78, 2007.

ZANETTE, S. V.; SAMPAIO, S. C.; SILVESTRE, M. G.; BOAS, M. A. V.; URIBEOPAZO, M. A.; QUEIROZ, M. M. F. DE. Análise espacial da umidade do solo cultivado com soja sob dois sistemas de manejo **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina grande, v. 11, n. 3, p. 239-247, 2007.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE MULTIVARIADA EM PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO E NA RESPOSTA DE PLANTAS DE SOJA CULTIVADAS EM SISTEMAS DE MANEJO DE LONGA DURAÇÃO

Resumo

Nas áreas das Ciências Agrárias encontram-se vários estudos avaliando muitas variáveis, porém sem considerar as possíveis relações de dependência entre elas. Uma maneira de considerar a estrutura de correlação das variáveis é utilizar técnicas de análise multivariada. Diante disto, o objetivo desta pesquisa foi verificar a influência das propriedades físicas e da capacidade de armazenamento de água do solo, bem como das respostas fisiológicas e de desenvolvimento radicular da cultura da soja na sua produtividade em diferentes sistemas de manejo do solo por meio da análise multivariada dos dados. Para isso foram conduzidos dois experimentos. O experimento I foi conduzido em Sistema de Semeadura Direta desde 1986, em blocos casualizados, com quatro repetições, sendo as parcelas compostas pelos manejos de solos (semeadura direta e preparo convencional). O experimento II foi manejado em sistema de semeadura direta desde 2003, em delineamento em blocos casualizados com quatro repetições. As parcelas foram compostas por três sistemas de manejo na safra da primavera (cultivo de crotalária, milheto e escarificação do solo). Foram avaliadas características físicas do solo, fisiológicas das plantas, desenvolvimento de raiz, e de infiltração e armazenamento de água no solo. Os dados foram submetidos à análise de componentes principais. Dentre as características avaliadas nos dois experimentos, as que mais influenciaram a produtividade da soja foi o teor relativo de água na folha, potencial hídrico da folha, massa seca de raiz, resistência do solo à penetração e a infiltração acumulada de água no solo, sendo que a produtividade se correlacionou com todos os fatores estudados, porém o que mais interfere na produção da soja são as propriedades físicas do solo.

Palavras-chave: Disponibilidade hídrica. Déficit hídrico. Plantio direto. Preparo convencional.

Abstract

In the areas of Agrarian Sciences, there are several studies evaluating many variables, but without considering the possible relations of dependence between them. One way to consider the correlation structure of variables is to use multivariate analysis techniques. Therefore, the aim of this research was to verify the influence of soil physical properties and water storage capacity, as well as the physiological and root development responses of the soybean crop on its productivity in different soil management systems through multivariate analysis of the data. For this, two experiments were conducted. Experiment I was conducted in no-tillage since 1986, in randomized blocks, with four replications, the plots being composed by the soil management (no-tillage and conventional tillage). Experiment II was managed in no-tillage system since 2003, in a randomized block design with four replications. The plots were composed of three management systems in the spring crop (sun hemp, millet and chiseling of the soil). Soil physical, physiological, root development, soil infiltration and water storage were analyzed. Data were submitted to principal component analysis. Among the characteristics evaluated in the two experiments, the ones that most influenced the soybean yield were the relative water content in the leaf, leaf water potential, root dry mass, soil resistance to penetration and accumulated infiltration of water in the soil. Since productivity correlated with all factors studied, the one that most affects soybean production is the physical properties of the soil.

Keywords: Soil water availability. Drought stress. No-tillage. Tillage.

2.1 INTRODUÇÃO

Para a expressão do máximo potencial genético das plantas é necessário que o ambiente forneça condições ideais de desenvolvimento. O sistema de manejo do solo está diretamente relacionado com essa expressão, pois altera as propriedades físicas do solo, afetando a dinâmica da água no solo, o desenvolvimento radicular, as respostas fisiológicas, e conseqüentemente a produtividade da cultura.

Há pesquisas avaliando o comportamento das plantas e as alterações no solo em diferentes sistemas de manejo, contudo, normalmente estes trabalhos avaliam

fatores separados, sendo as pesquisas voltadas mais para a parte fisiológica das plantas, ou para a parte edáfica, ou fitotécnica (Fernandes et al., 2015; Rigon et al., 2018; Galdo et al., 2019). Faltam ainda na literatura, pesquisas que englobam todas estas variáveis para tentar entender melhor o comportamento das culturas econômicas em diferentes sistemas de manejo do solo e de produção.

Geralmente, as pesquisas científicas na área agronômica realizam várias medições em um mesmo objeto de estudo, todavia, no momento da análise dos dados, muitos pesquisadores acabam ignorando as possíveis relações de dependência entre as variáveis, utilizando procedimentos estatísticos de forma unitária (univariada). Assim, podendo haver perda de informações ou mascarar resultados, levando a conclusões equivocadas.

Uma maneira de considerar a estrutura de correlação das variáveis é utilizar técnicas de análise multivariada (Johnson e Wichern, 2007). Essa análise pode ser definida como métodos estatísticos que utilizam, simultaneamente, as medidas retiradas de um objeto de estudo para resumir toda a informação presente nesse objeto (Hair et al., 2009).

Os métodos exploratórios multivariados (análise de componentes principais, análise fatorial, análise de agrupamento ou Cluster e análise de correlação canônica) buscam estudar a estrutura da correlação presente nas variáveis e simplifica-las (Mingoti, 2013). Sendo que a escolha da técnica multivariada que será empregada, dependente do objetivo do estudo, quantidade de variáveis dependentes e independentes e também da escala de medida dessas variáveis (Gouvêa et al., 2012).

O uso dessa ferramenta nas pesquisas agronômicas mostra-se bastante promissora, porém pouco explorada, tendo em vista a quantidade de publicações geradas nesta área de conhecimento e das informações mais refinadas que as técnicas multivariadas podem fornecer para a pesquisa (Batistela e Padovani, 2015; Soares et al., 2016).

Diante do exposto, objetivo desta pesquisa foi verificar a influência das propriedades físicas e da capacidade de armazenamento de água do solo, bem como das respostas fisiológicas e de desenvolvimento radicular da cultura da soja na sua produtividade em diferentes sistemas de manejo do solo por meio da análise multivariada dos dados.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Localização

Foram conduzidos dois experimentos na área experimental da Fazenda Lageado, na Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, localizada no município de Botucatu (SP), com latitude 22°49'S, longitude 48°25' WGrw e altitude de 786 m, em Nitossolo Vermelho distrófico. O clima da região, segundo classificação de Köppen, é do tipo Cwa, que significa clima mesotérmico com inverno seco.

2.2.2 Histórico e condução das áreas experimentais

2.2.2.1 Experimento I

O experimento foi conduzido comparando Sistema Semeadura Direta (SSD) e Sistema de Preparo Convencional (SPC) desde 1986, sendo o histórico de cultivo apresentado na Tabela 1.

O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados com quatro repetições. As parcelas (320 m²) foram constituídas pelos dois sistemas de manejo do solo (SSD e SPC).

Tabela 1 – Manejo do solo e sucessão de culturas no experimento I.

Ano agrícola	Sistema de manejo				Safrinha outono-inverno/primavera-verão	
	SPC		SSD			
	Outono	Primavera	Outono	Primavera		
1985/86	Aração + gradagem	Aração + gradagem	Aração + gradagem	Sem preparo	Trigo/soja	
1986/87	a	Aração + gradagem	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Trigo/soja
1994/95						
1995/96	a	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Pousio/pousio
1998/99						
1999/00		Aração + gradagem	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Aveia preta/milho
2000/01	e	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Pousio/pousio
2001/02						
2002/03	e	Aração + gradagem	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Aveia preta/milheto-feijão
2003/04						
2004/05	e	Aração + gradagem	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Aveia preta/milho
2005/06						
2006/07		Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Pousio/soja
2007/08		Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Aveia amarela/feijão
2008/09		Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Aveia amarela/feijão
2009/10	a	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Aveia preta/milho+baquiária
2011/12						
2012/13		Sem preparo	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Braquiária/soja
2013/14		Sem preparo	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Trigo/soja
2014/15		Sem preparo	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Cártamo/soja
2015/16		Sem preparo	Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Cártamo/milho
2016/17		Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Aveia preta/milho
2017/18		Aração + gradagem	Sem preparo	Sem preparo	Sem preparo	Aveia preta/soja

2.2.2.2 Experimento II

A área foi conduzida em sistema de semeadura direta (SSD) entre os anos de 1997 e 2003 com a rotação soja/aveia preta/milho/triticale. A partir de 2003 iniciou-se um experimento com diferentes rotações de culturas envolvendo plantas de cobertura. Desde então, no outono-inverno é cultivado o triticale (*X Triticosecale* Wittmack), na primavera foram cultivadas as espécies de plantas de cobertura milheto (*Pennisetum glaucum* L.) e crotalária juncea (*Crotalaria juncea* L.), havendo também um tratamento com ausência do cultivo de plantas de cobertura, na qual foi realizada escarificação em 2003, 2009, 2013 e 2016. E no verão foi cultivado soja em área total.

O experimento foi montado em delineamento de blocos casualizados com quatro repetições, sendo as parcelas (de 20 m²) constituídas por três sistemas de manejo: cultivo de crotalária, milho e escarificação do solo a cada três anos.

Na Tabela 2 estão representados os esquemas de rotações de culturas utilizados no experimento II.

Tabela 2 - Esquema de rotação de culturas no experimento II.

Ano	Outono/inverno	Primavera	Verão
1997/98	--	--	Milho
1998/99	Triticale	--	Soja
1999/00	Aveia preta	--	Milho
2000/01	Triticale	--	Soja
2001/02	Aveia preta	--	Milho
2002/03	Triticale		Soja
2003/04 a 2016/2017	Triticale	Crotalária	
		Milho	Soja
		Pousio	
		Crotalária	
2017/18	Milho	Milho Pousio	Soja

2.2.3 Avaliações na cultura

A cultivar de soja utilizada foi a TMG 7062 IPRO, a semeadura foi realizada em 08/12/2017 com densidade de 15 sementes por metro linear, e a colheita foi realizada 111 dias após a semeadura (29/03/2018).

A estimativa da produtividade da soja foi realizada após a maturidade fisiológica dos grãos (R9), colhendo-se as plantas da útil das parcelas (4,5 m²), descartando as bordaduras, sendo o teor de água dos grãos corrigidos para 130 g kg⁻¹.

A análise de raiz foi realizada no momento do florescimento pleno da cultura. Para isso foram coletadas amostras de solo com trado “tipo caneca” (com volume conhecido) na profundidade de 0,00-0,40 m, sendo quatro subamostras por profundidade para compor uma amostra. Após a coleta, as porções de solo contendo as raízes foram acondicionadas em sacos plásticos vedados e congeladas a -2°C e em seguida foram lavadas, guardadas em recipiente contendo 30% de álcool e 70% de água e armazenadas em ambiente refrigerado. Posteriormente, as

amostras foram submetidas a um “scanner” de leitura ótica na resolução de 250 dpi, e as imagens obtidas foram analisadas com o programa “Win Mac Rhizo” para determinar a densidade de comprimento radicular (cm de raiz por cm³ de solo), área radicular (cm² de raiz por cm³ de solo) e o diâmetro médio (mm). Logo após as amostras foram colocadas em sacos de papel e secas em estufa de aeração forçada a 60°C por 48h para determinação da massa seca.

No estágio de pleno florescimento (R1) foi avaliado o índice SPAD por meio do clorofilômetro SPAD-502 (Minolta Corp., Ransey, NJ, EUA), em cinco plantas por parcela; o índice de área foliar (IAF), sendo coletadas todas as folhas das plantas em 0,5 m, e em seguida analisadas em integrador de área foliar de bancada (LICOR, modelo LI-3100C, Lincoln, NE, EUA); o teor relativo de água na folha (TRA) e o potencial hídrico foliar (Ψ_w), com auxílio de uma câmara de Scholander (SoilMoisture Equipment, Santa Bárbara, CA, EUA).

O índice SPAD é uma medida indireta para se quantificar a clorofila, mediante emissão de feixe de luz o aparelho quantifica a intensidade do verde, no limbo foliar, correlacionando desta forma com a quantidade de clorofila no tecido foliar. O valor da leitura da unidade SPAD indica o teor de pigmento na folha e é equivalente à quantidade de luz transmitida pela folha em duas faixas de comprimento de onda, nas quais a absorção pela clorofila é diferente (Malavolta et al., 1997). Neste caso, o valor é proporcional à quantidade de clorofila presente na folha.

O IAF foi calculado com a relação da área foliar total das plantas (m²) por unidade de terreno (0,225 m²) disponível para as plantas (Watson, 1947a, b), conforme a equação 2:

$$IAF = \frac{\text{área foliar total}}{\text{área da superfície do solo}} \quad (2)$$

Para a análise de TRA foram analisadas cinco plantas, sendo coletados dois discos foliares (0,69 cm² cada) da terceira folha (sentido do ápice para a base) de cada planta e determinada a massa fresca do tecido (W_f) em balança analítica. Após isso, as amostras foram reidratadas em água destilada por 24 horas, para a obtenção da massa túrgida (W_t), fazendo-se uso de papel toalha para extrair o excesso de água. A massa seca (W_d) foi obtida após os discos permanecerem em estufa de circulação de ar forçada a 80°C por 48 horas. Os valores de TRA foram obtidos pela equação de Jamaux et al.(1997):

$$TRA = [(W_f - W_d) \times (W_t - W_d)^{-1}] \times 100 \quad (3)$$

O Ψ_w foi medido no período mais quente do dia, entre 12:00 e 14:00h, pois assim observam-se os menores valores de potencial hídrico foliar.. O Ψ_w foi determinado na extremidade (ponta) da terceira folha (sentido do ápice para a base), onde foi aplicada pressão até ocorrer à exsudação pelo corte feito no pecíolo da folha.

2.2.4 Avaliações no solo

O conteúdo de água no solo foi avaliado por meio de tubos de acesso para leituras de umidade através de uma sonda de capacitância (modelo Diviner[®], Sentek Pt Ltda.). O monitoramento do conteúdo de água foi feito da superfície até 0,40 m de profundidade (intervalo de 0,10 m), com leituras ao 1, 3, 5, 8, 15 e 30 dias após a chuva (DAC), para esta avaliação foi considerada chuvas acima de 10 mm. Os valores de água armazenada (AA) foi o resultado da soma dos valores de umidade até a profundidade de 0,40 m em cada unidade experimental; e para cada dia de leitura foi feita a média de AA.

Por ocasião das coletas de raízes foi realizado o teste de resistência do solo à penetração (RP) em três pontos por parcela, por meio do Penetrômetro de impacto (modelo IAA/ Planalsucar-Stolf).

Para a avaliação da densidade do solo (Ds), macroporosidade (MP), microporosidade (mp), porosidade total (PT), capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) foram coletadas, por parcela, duas amostras de solo com estrutura indeformada em cada profundidade, utilizando anéis volumétricos, pelo método da trincheira (Blake e Hartge, 1986; Smith e Mullins, 1991; Embrapa, 2017). Com os valores de CC e PMP foi possível calcular a capacidade máxima de água disponível (CAD), subtraindo-se do valor de umidade na CC a umidade no PMP (Reeve e Carter, 1991).

A infiltração de água no solo foi avaliada pelo método do infiltrômetro de anéis concêntricos, conforme Bernardo et al. (2006). Essa metodologia baseia-se no uso de dois anéis, que são posicionados de forma concêntricos no solo. O anel interno com diâmetro de 30 cm e o externo de 60 cm, ambos com 30 cm de altura. Os anéis foram cravados verticalmente 15 cm no solo. O anel externo tem como finalidade reduzir o efeito da dispersão lateral da água infiltrada do anel interno. Assim a água do anel interno infiltra no perfil do solo em uma direção predominante vertical, o que evita superestimativa da taxa de infiltração. A leitura de infiltração foi realizada no

anel interno, com uma régua colocada verticalmente dentro do anel e a reposição do volume de água era realizada sempre que o volume de água se aproximava de cinco cm dentro do anel. A leitura foi realizada até que a taxa de infiltração no anel interno tornou-se aproximadamente constante com o tempo (cinco valores semelhante). Foram realizadas leituras nos seguintes intervalos de tempo: cinco repetições de um minuto; cinco repetições de dois minutos; cinco repetições de cinco minutos; cinco repetições de dez minutos; cinco repetições de quinze minutos; cinco repetições de vinte minutos; e por fim, intervalos de trinta minutos, até que a taxa de infiltração se estabilizasse. Os dados experimentais foram ajustados pelas equações de infiltração conforme os modelos matemáticos propostos por Kostiakov-Lewis. Para obtenção do tempo da velocidade de infiltração básica (VIB), foi usada a equação 1:

$$VIB = \left(-\frac{0,001}{C.n.(n-1)} \right)^{\frac{1}{n-2}} \quad (1)$$

Em que VIB é a velocidade de infiltração básica; n é a declividade da reta, determinada no local para cada tipo de solo; e C é a constante que evidencia lâmina infiltrada no primeiro minuto, em cm.

2.2.5 Análise estatística

Para a análise exploratória dos dados, as variáveis foram divididas em quatro grupos:

Fisiológicas: SPAD, IAF, TRA e Ψ_w ;

Raiz: densidade de comprimento radicular, área radicular, diâmetro médio e massa seca de raiz;

Física do solo: RP, PT, MP, mp, e DS;

Água no solo: CAD, IA, VIB, AA1DAC, AA3DAC, AA5DAC, AA8DAC e AA15DAC.

Em cada grupo de variável foi aplicado à análise de componentes principais (ACP) (Hair et al., 2005), por meio do algoritmo de mínimos quadrados parciais iterativos não-lineares (NIPALS), pelo fato do número reduzido de observações, comparado com o número de variáveis.

A ACP é uma técnica multivariada que transforma um conjunto de variáveis, inicialmente correlacionadas entre si, em outro não correlacionado. O objetivo fundamental dessa técnica é reduzir a dimensão do banco de dados, buscando preservar grande parte da estrutura de variabilidade presente no mesmo.

A redução do espaço paramétrico se dá por meio da obtenção dos chamados componentes principais que nada mais são do que combinações lineares das variáveis originais. Se existem $p + q$ variáveis originais, encontram-se até $p + q$ componentes principais, entretanto, busca-se trabalhar com um número menor de componentes, suficientes para explicar uma quantidade considerável da variabilidade dos dados.

O número de componentes a serem utilizados na análise varia de acordo com cada estudo. Uma vez que $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_{p+q}$, alguns autores sugerem analisar os primeiros componentes. Por outro lado, pode-se determinar um limiar mínimo aceitável de variabilidade acumulada pelos componentes e eleger aqueles que respeitem esse limite. Nessa pesquisa, por exemplo, foram considerados satisfatórios para as análises os componentes que acumulassem, ao menos, 70% da variabilidade dos dados. Uma vez selecionados os componentes, cada observação recebe um escore referente a cada componente e então as análises estatísticas são realizadas com base nesses escores.

Os quatro grupos de variáveis foram então comparados segundo os escores das observações nos componentes com os escores da produtividade, por meio de gráficos de dispersão dos escores, considerando os valores de cada repetição.

Após a análise de PCA, os valores de escores da componente principal de cada grupo de variável foram submetidos à análise de variância e ao teste t de comparação de médias ao nível de 5% de probabilidade.

Os componentes principais selecionados de cada grupo de variável foram submetidos à análise de correlação simples de Pearson, para assim verificar a influência de cada fator sobre a produtividade e a influência do componente água na fisiologia das plantas de soja.

Ressaltando, que para as variáveis que envolveram profundidade do solo, para a análise estatística foram consideradas as médias da profundidade de 0,00-0,4 m.

Foi utilizado para as análises multivariadas e correlação de Pearson o programa R, e para a ANOVA o programa estatístico AgroEstat (Barbosa e Maldonado, 2015).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Experimento I

A partir da matriz de correlação entre todos os pares das variáveis fisiológicas (índice SPAD, índice de área foliar - IAF, teor relativo de água na folha - TRA e potencial hídrico - Ψ_w), foram obtidos os 8 autovalores e seus respectivos autovetores para a análise de componentes principais. A Tabela 3 contém os agrupamentos formados e as respectivas porcentagens de variâncias explicadas dos 4 grupos formados.

Tabela 3 - Componentes principais (CP) das variáveis fisiológicas e variância explicada. Botucatu-SP, 2019.

CP	Variância explicada (%)	Variância acumulada (%)
PC1	92,45	92,45
PC2	5,93	98,38
PC3	1,13	99,51
PC4	0,49	100

Como estabelecido no tópico Material e Métodos (item 2.2.5.), foram contemplados para análise de componentes principais o menor número de agrupamento, que captem juntos pelo menos 70% da variância total, desta forma, tomou-se apenas o primeiro componente (PC1_Fisiologia), que sozinho representa mais de 90% da variabilidade.

Na PC1_Fisiologia é possível identificar que o TRA foi a variável que mais contribui para as respostas fisiológicas das plantas de soja (Tabela 4), seguido do Ψ_w , porém com menor relevância, e ambos com carga negativa, enquanto que o SPAD e o IAF contribuem de forma positiva e pouco significativa.

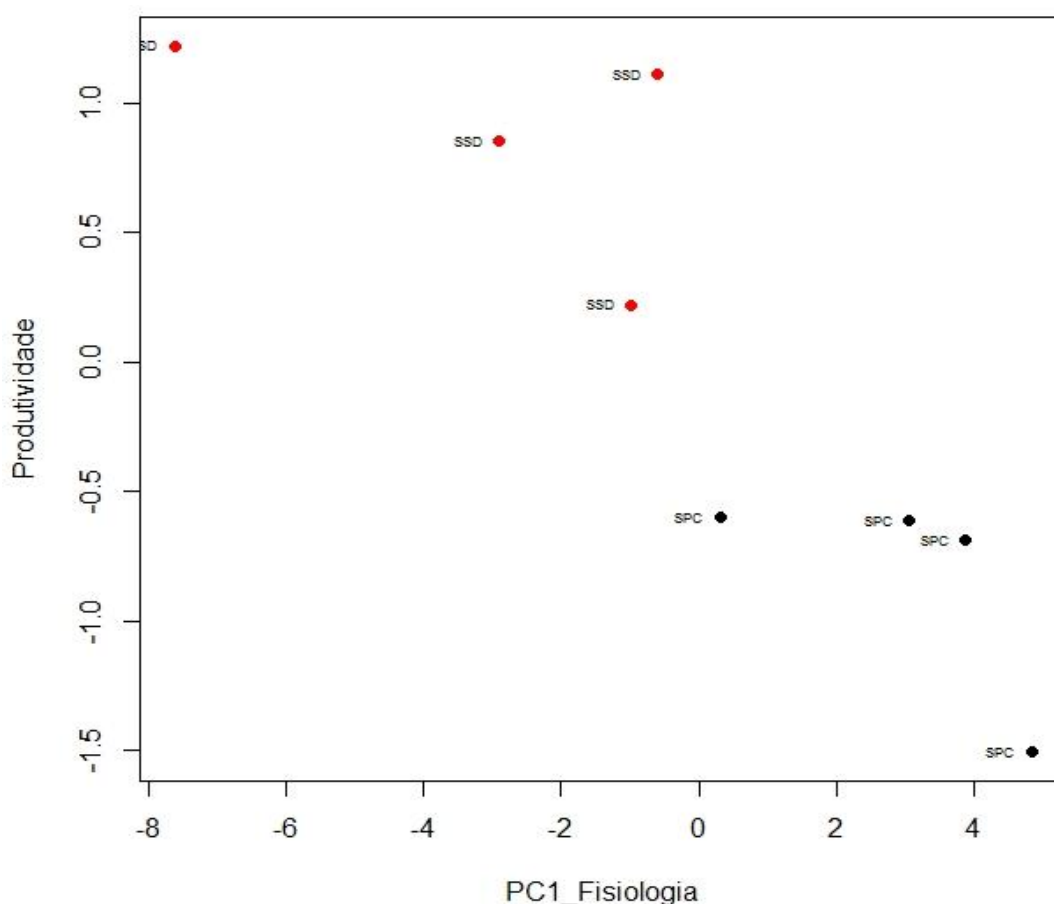
Tabela 4 - Loadings da componente principal 1 (CP1) das variáveis fisiológicas. Botucatu-SP, 2019.

Loadings	CP1
SPAD	0,06
IAF	0,09
TRA	-0,93
Ψ_w	-0,34

Na Figura 1 nota-se a dispersão bidimensional dos tratamentos e suas respectivas repetições. No eixo horizontal (CP1_fisiologia) houve a evidente

separação entre o sistema preparo convencional (SPC) e o sistema semeadura direta (SSD), em que o SPC assumiu valores positivos e o SSD valores negativos. Assim foi possível identificar que a baixa produtividade no sistema SPC está relacionada a altos valores dos componentes fisiológicos, sendo que a principal variável responsável por este comportamento é o TRA (Tabela 4). Com base nos resultados apresentado na Tabela 4, nota-se que a baixa produtividade, expressa na Figura 1, no SPC está associada a baixo TRA e Ψ_w e a alto SPAD e IAF.

Figura 1 - Dispersão das observações na componente principal 1 (PC1_Fisiologia) das variáveis fisiológicas. Botucatu-SP, 2019. SPC: sistema de preparo convencional do solo; SSD: sistema de semeadura direta.



Já no SSD verificou-se que a alta produtividade está associada a baixos valores da CP1_fisiologia. Apresentando comportamento oposto ao SPC, pois tais resultados estão relacionados com alto TRA e Ψ_w e baixo SPAD e IAF.

Com base nestes resultados, nota-se que as plantas de soja estão tendo maior disponibilidade de água no SSD e menor déficit hídrico, pois apresentaram maior conteúdo de água na folha. Este comportamento também pode ser observado na análise de correlação de Pearson entre as componentes de água e fisiologia (Figura 6) que apresenta valor de 0,76, indicando que quanto maior o armazenamento de água no solo, maior será o conteúdo de água na folha, já que o TRA é a principal variável da CP1_fisiologia.

As diferenças dos sistemas de manejos associados às componentes fisiológicas também podem ser observadas por meio da análise de variância e teste de média, conforme apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 - Teste de média por análise univariada da componente principal 1 das variáveis fisiológicas. Botucatu-SP, 2019.

Sistema de manejo	Componente principal 1
SPC	3,02 a
SSD	-3,02 b

Médias seguidas por letras iguais minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Student (LSD) ao nível de 5% de probabilidade. SPD: sistema de preparo convencional; SSD: sistema de semeadura direta.

Apesar de não ser possível inferir pela ANOVA qual tratamento é superior ao outro, pois esta análise foi realizada pelos dados dos scores de cada variável dentro deste componente, é possível verificar na Figura 1 e com os resultados da correlação que a produtividade da soja foi maior no SSD quando associada a estas variáveis fisiológicas.

Para os dados de raiz (área radicular – ARAD, diâmetro médio – DIAM, densidade radicular – DRAD e massa seca de raiz – MSR), também foram obtidos os autovalores e seus respectivos autovetores para a análise de componentes principais a partir da matriz de correlação entre todos os pares desta variável. A Tabela 6 contém os agrupamentos formados e as respectivas porcentagens de variâncias explicadas.

Tabela 6 - Componentes principais (CP) das variáveis de raiz e variância explicada. Botucatu-SP, 2019.

CP	Variância explicada (%)	Variância acumulada (%)
PC1	99,99	99,99
PC2	$6,96 \times 10^{-8}$	99,99
PC3	$2,79 \times 10^{-9}$	99,99
PC4	$2,35 \times 10^{-12}$	100

Como pode ser observado na Tabela 6, apenas a CP1 das variáveis de raiz representa quase totalidade da variabilidade total dos dados, portanto, para fins de exploração dos resultados será considerada apenas esta componente. Nesta CP1 nota-se que a variável de maior peso é a MSR (Tabela 7) e que as demais variáveis apresentam valores quase que insignificantes.

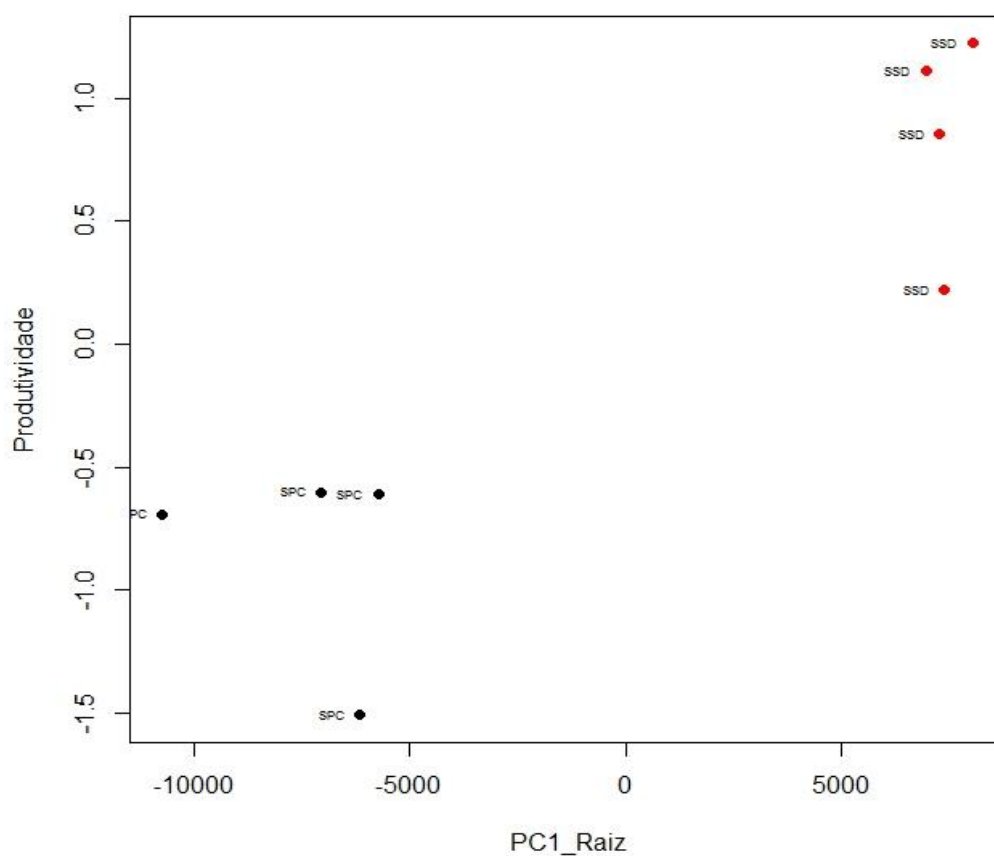
Tabela 7 - Loadings da componente principal 1 (CP1) das variáveis de raiz. Botucatu-SP, 2019.

Loadings	CP1
ARAD	$8,13 \times 10^{-6}$
DIAM	$-3,25 \times 10^{-6}$
DRAD	$4,03 \times 10^{-4}$
MSR	$-9,99 \times 10^{-1}$

Na Figura 2 está representada a dispersão das amostras. Percebe-se que houve diferença no comportamento desta componente entre os sistemas de manejo avaliados. No SPC, a produtividade e o PC1_Raiz assumiram valores negativos, isso indica que a baixa produtividade neste sistema está associada à alta massa seca de raiz, raízes com diâmetros maiores e baixa área e densidade radicular. Este comportamento pode ser explicado pelo resultado da correlação de Pearson dos componentes de física do solo e os de raiz (Figura 6), já que apresentou correlação positiva de 0,93. Sendo assim, nota-se que quanto maior a RP, maior foi a CP1_Raiz, indicando que a planta está tendo gastos energéticos com a produção de raiz para tentar romper a camada compactada, assim explicando o maior diâmetro e quantidade de raízes (Reichert et al., 2007). Sendo esta possível adaptação das plantas, uma forma de escapar dos efeitos de déficits hídricos, tentando aprofundar o sistema radicular para absorção de água.

Já no SSD a alta produtividade está associada à baixa massa radicular, presença de raízes com menores diâmetros, porém com maior área e densidade radicular. Estes resultados contribuem com os encontrados na PC1_Fisiologia, pois ao analisar a correlação de $-0,88$ entre os componentes de água e raiz (Figura 6) notou-se que quanto maior a disponibilidade de água no solo, menor foi a produção de raiz, já que a planta não tinha necessidade de expandir seu sistema radicular, tendo em vista que tinha água disponível para absorção.

Figura 2 - Dispersão das observações na componente principal 1 (PC1_Raiz) das variáveis de raiz. Botucatu-SP, 2019. SPC: sistema de preparo convencional do solo; SSD: sistema de semeadura direta.



Pela ANOVA e teste de média também foi possível identificar a diferença na CP1_Raiz (Tabela 8), corroborando com os resultados apresentados na Figura 2.

Tabela 8 - Teste de média por análise univariada da componente principal 1 das variáveis de raiz. Botucatu-SP, 2019.

Sistema de manejo	Componente principal 1
SPC	-7405,15 b
SSD	7405,15 a

Médias seguidas por letras iguais minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Student (LSD) ao nível de 5% de probabilidade. SPD: sistema de preparo convencional; SSD: sistema de semeadura direta.

As variáveis de física do solo (resistência do solo à penetração - RP, porosidade total – PT, macroporosidade – Mp, microporosidade – mp e densidade do solo – Ds), também foram submetidas à análise de componentes principais, obtendo assim os agrupamentos e as respectivas porcentagens de variância explicada (Tabela 9).

Tabela 9 - Componentes principais (CP) das variáveis de física do solo e variância explicada. Botucatu-SP, 2019.

CP	Variância explicada (%)	Variância acumulada (%)
PC1	99,71	99,71
PC2	$2,29 \times 10^{-3}$	99,94
PC3	$5,03 \times 10^{-4}$	99,99
PC4	$5,92 \times 10^{-5}$	100
PC5	0,00	100

A componente principal 1 (CP1_física) explica mais de 99% da variância total dos dados, por isso será considerada neste trabalho apenas esta componente para fins de exploração.

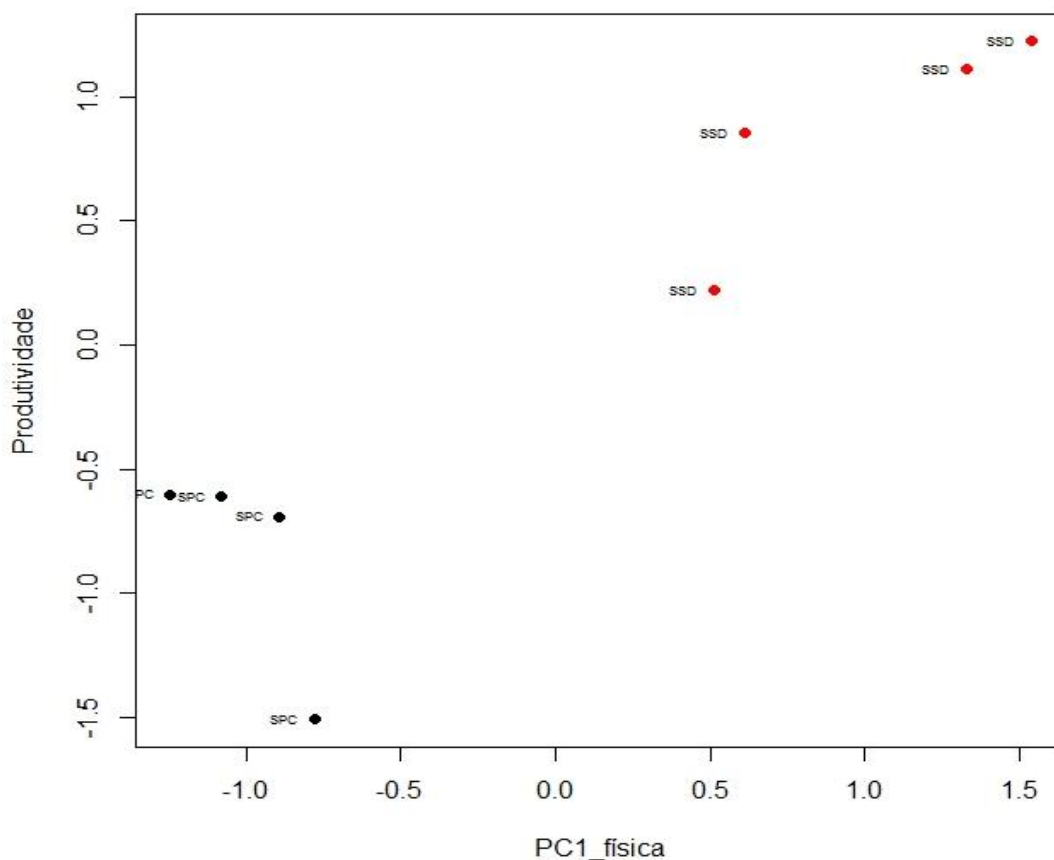
A variável de maior peso nesta componente foi a RP (Tabela 10) que simula a força que a raiz exerce para crescer neste solo, as demais variáveis apresentaram pouca contribuição na expressividade da CP1_física.

Tabela 10 - Loadings da componente principal 1 (CP1) das variáveis de física do solo. Botucatu-SP, 2019.

Loadings	CP1
RP	0,99
PT	-0,01
Mp	-0,01
Mp	0,00
Ds	0,05

Observando a dispersão dos tratamentos na Figura 3, percebe-se que também houve diferença entre os tratamentos. No SPC, a produtividade e a PC1_física assumiram valores negativos. Considerando que para a PC1_física ser baixa, a RP (variável de maior expressividade) também foi baixa. Já o SSD apresentou alta produtividade e valores da PC1_física, para isso os valores de RP também foram altos, sendo assim, pode-se inferir que altos valores de RP não afetaram a produtividade da soja em sistema de semeadura direta.

Figura 3 - Dispersão das observações na componente principal 1 (PC1_física) das variáveis de física do solo. Botucatu-SP, 2019. SPC: sistema de preparo convencional do solo; SSD: sistema de semeadura direta.



Os resultados observados na Figura 3, também podem ser notados na Tabela 11, por meio da ANOVA e teste de média de Student.

Tabela 11 - Teste de média por análise univariada da componente principal 1 das variáveis fisiológicas. Botucatu-SP, 2019.

Sistema de manejo	Componente principal 1
SPC	-0,99 b
SSD	0,99 a

Médias seguidas por letras iguais minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Student (LSD) ao nível de 5% de probabilidade. SPD: sistema de preparo convencional; SSD: sistema de semeadura direta.

Vale ressaltar que normalmente em SSD os valores de RP são superiores ao do SPC, pois não há o revolvimento constante do solo e o tráfego de máquinas acaba resultando em maiores valores de DS e RP e afetando negativamente a porosidade do solo na camada superficial. Porém, é importante lembrar também, que em SSD há maior continuidade dos poros, devido a diferentes sistemas radiculares que exploram o solo, proporcionado pela rotação de culturas (Galdos et al., 2019). Desta forma, a alta RP não interfere tão negativamente na produtividade, devido às demais compensações que este sistema fornece ao ambiente agrícola.

Além dos resultados de fisiologia, raiz e física do solo, também foi aplicada a análise de componentes principais nas características de armazenamento e infiltração de água no solo. Para este grupo foram consideradas as seguintes variáveis: capacidade máxima de armazenamento de água do solo – CAD, infiltração acumulada – IA, velocidade de infiltração básica– VIB, água armazenada 1 dia após a chuva – AA1DAC, água armazenada 3 dias após a chuva – AA3DAC, água armazenada 5 dias após a chuva – AA5DAC, água armazenada 8 dias após a chuva – AA8DAC e água armazenada 15 dias após a chuva – AA15DAC. Os agrupamentos e suas respectivas porcentagens de variância estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Componentes principais (CP) das variáveis de água e variância explicada. Botucatu-SP, 2019.

CP	Variância explicada (%)	Variância acumulada (%)
PC1	99,73	99,73
PC2	0,26	99,99
PC3	$5,66 \times 10^{-5}$	100
PC4	$2,39 \times 10^{-7}$	100
PC5	$3,98 \times 10^{-8}$	100
PC6	$4,15 \times 10^{-9}$	100
PC7	$4,40 \times 10^{-10}$	100
PC8	0,00	100

Para interpretação dos resultados será considerada apenas a primeira componente (CP1_água), pois explica praticamente a totalidade da variância total. Nesta componente a IA foi a variável que expressou maior peso (Tabela 13),

seguida da VIB, e as demais características avaliadas quase não contribuíram na expressividade da CP1_Água.

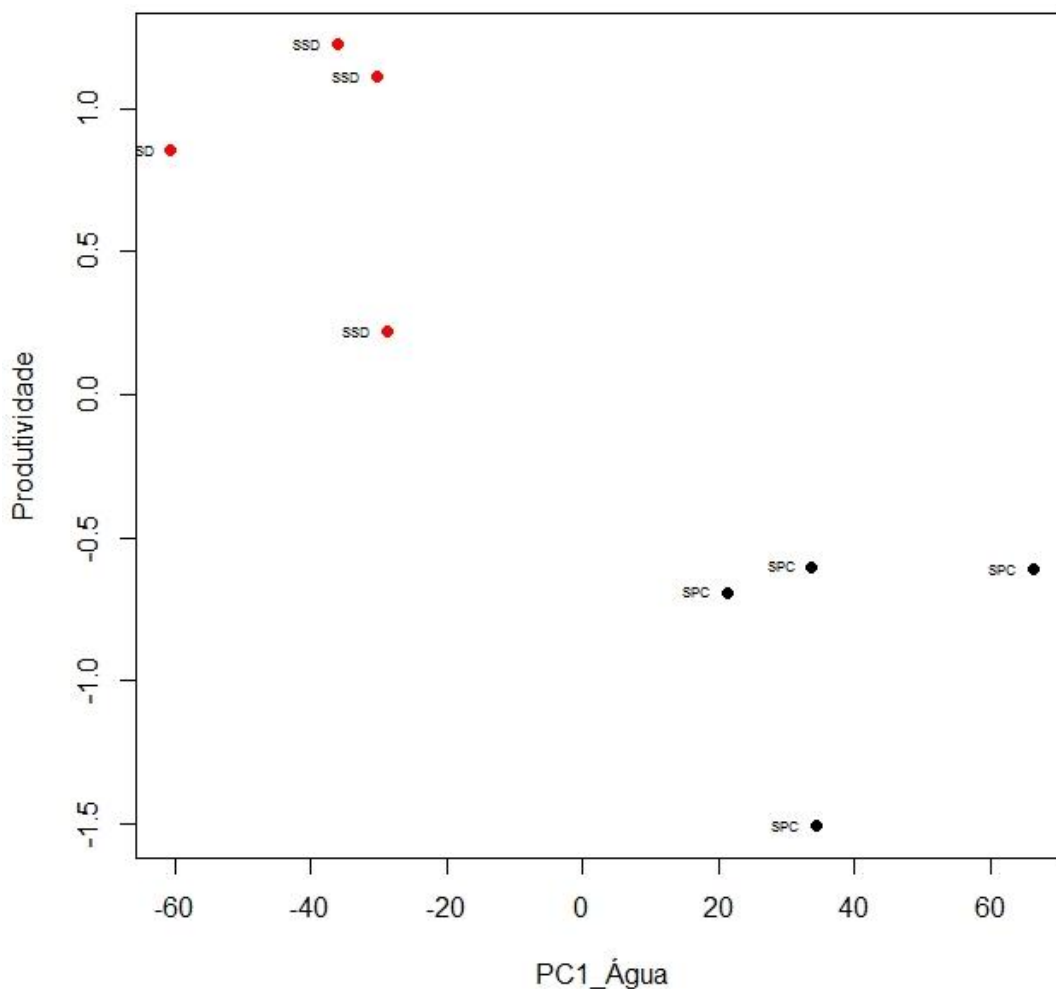
Tabela 13 - Loadings da componente principal 1 (CP1) das variáveis de água no solo. Botucatu-SP, 2019.

Loadings	CP1
CAD	0,00
IA	-0,98
VIB	-0,19
AA1DAC	0,00
AA3DAC	0,00
AA5DAC	0,00
AA8DAC	0,00
AA15DAC	0,00

Pelos componentes de água e produtividade da soja também foi possível diferenciar os sistemas de manejos (Figura 4). No SSD a produtividade assumiu valores positivos e a CP1_Água valores negativos, indicando que a alta produtividade neste sistema é resultante da alta IA e VIB, já que são as variáveis de maior importância nesta componente.

O SPC apresentou baixa produtividade quando a CP1_Água foi alta, isso implica dizer que houve baixa infiltração de água e baixa velocidade de infiltração. A baixa IA implica em menor armazenamento de água no solo e, conseqüentemente, menor disponibilidade às plantas, corroborando com os resultados expostos na Figura 1, e resultando em menor produção de grãos.

Figura 4 - Dispersão das observações na componente principal 1 (PC1_Água) das variáveis de água no solo. Botucatu-SP, 2019. SPC: sistema de preparo convencional do solo; SSD: sistema de semeadura direta.



Os resultados observados na Figura 4, também podem ser notados na Tabela 14, por meio da ANOVA e teste de média de Student.

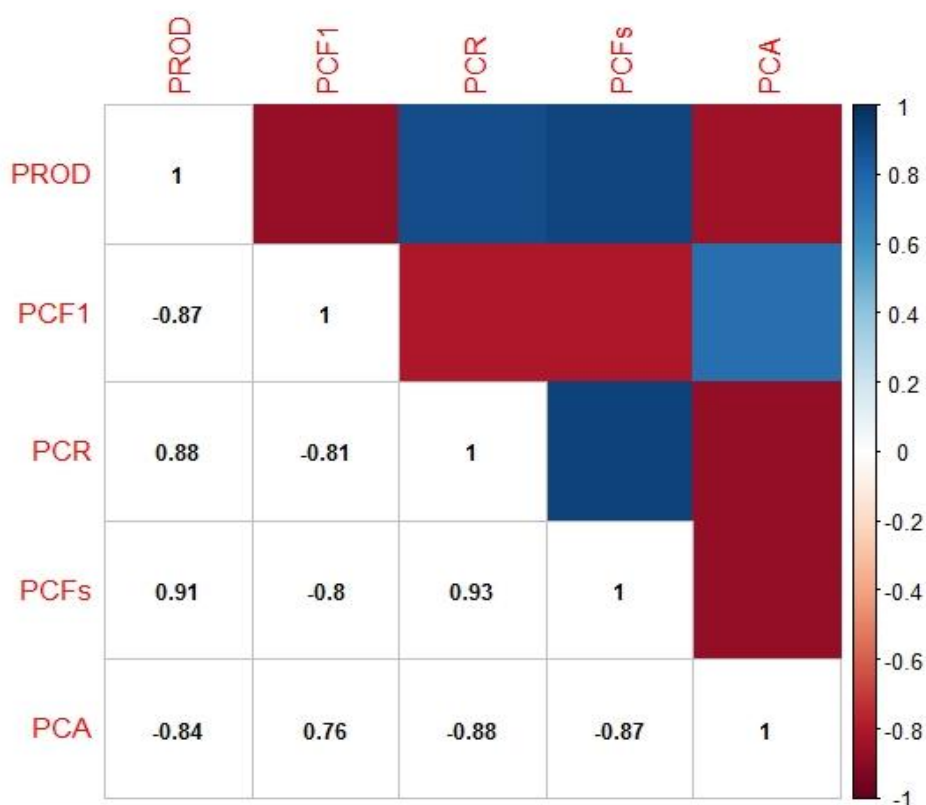
Tabela 14 - Teste de média por análise univariada da componente principal 1 das variáveis de água. Botucatu-SP, 2019.

Sistema de manejo	Componente principal 1
SPC	38,98 a
SSD	-38,98 b

Médias seguidas por letras iguais minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Student (LSD) ao nível de 5% de probabilidade. SPD: sistema de preparo convencional; SSD: sistema de semeadura direta.

0,91. Mostrando que quanto maior a PCFs (valores positivos de RP e Ds; e valores negativos para macro, micro e porosidade total), maior a produtividade da soja (PROD).

Figura 6 - Correlação de Pearson entre os componentes principais de maior expressividade de cada conjunto de variável. Botucatu-SP, 2019. PROD: produtividade; PCF1: componentes das variáveis fisiológicas; PCR: componentes das variáveis de raiz; PCFs: componentes das variáveis de física do solo; PCA: componentes das variáveis de água no solo.



Ainda na Figura 6, observa-se que a PCFs está relacionada diretamente com o desenvolvimento radicular (PCR). Já que valores positivos de PC1_física implica em alta RP e valores positivos de PC1_Raiz significa pouca MSR, isso significa que quando houve maior RP as plantas de soja apresentaram mais raiz, como estratégia para tentar maximizar o volume de solo explorado para melhor absorção de água e nutrientes, desta forma expressando seu resultado na PROD.

A influência da PCFs sobre a PROD também pode ser explicada pelas correlações negativas entre PCFs com as componentes fisiológicas (PCF1) e a de água (PCA). Considerando os loadings de cada variável dentro de cada componente (Tabelas 4, 10 e 13), foi possível inferir que altos valores de RP, resultam em maiores TRA, o que pode ser explicado pela maior IA no solo.

2.3.2 Experimento II

A aplicação da análise multivariada no experimento envolvendo diferentes rotações de cultura gerou uma matriz de correlação entre todos os pares das variáveis fisiológicas (índice SPAD, índice de área foliar - IAF, teor relativo de água na folha - TRA e potencial hídrico - Ψ_w), na qual foram obtidos os autovalores e seus respectivos autovetores para a análise de componentes principais. A Tabela 15 contém os agrupamentos formados e as respectivas porcentagens de variâncias explicadas dos 4 grupos formados.

Tabela 15 - Componentes principais (CP) das variáveis fisiológicas e variância explicada. Botucatu-SP, 2019.

CP	Variância explicada (%)	Variância acumulada (%)
PC1	75,17	75,17
PC2	18,08	93,25
PC3	6,29	99,54
PC4	0,46	100

Para fins de interpretação dos resultados será considerado o mínimo número de variáveis possíveis, em que a soma da variância acumulada seja igual ou superior a 70%. Sendo assim para as variáveis fisiológicas foi explorada apenas a PC1 (PC1_Fisiologia), que sozinha representa 75,17% da variabilidade total.

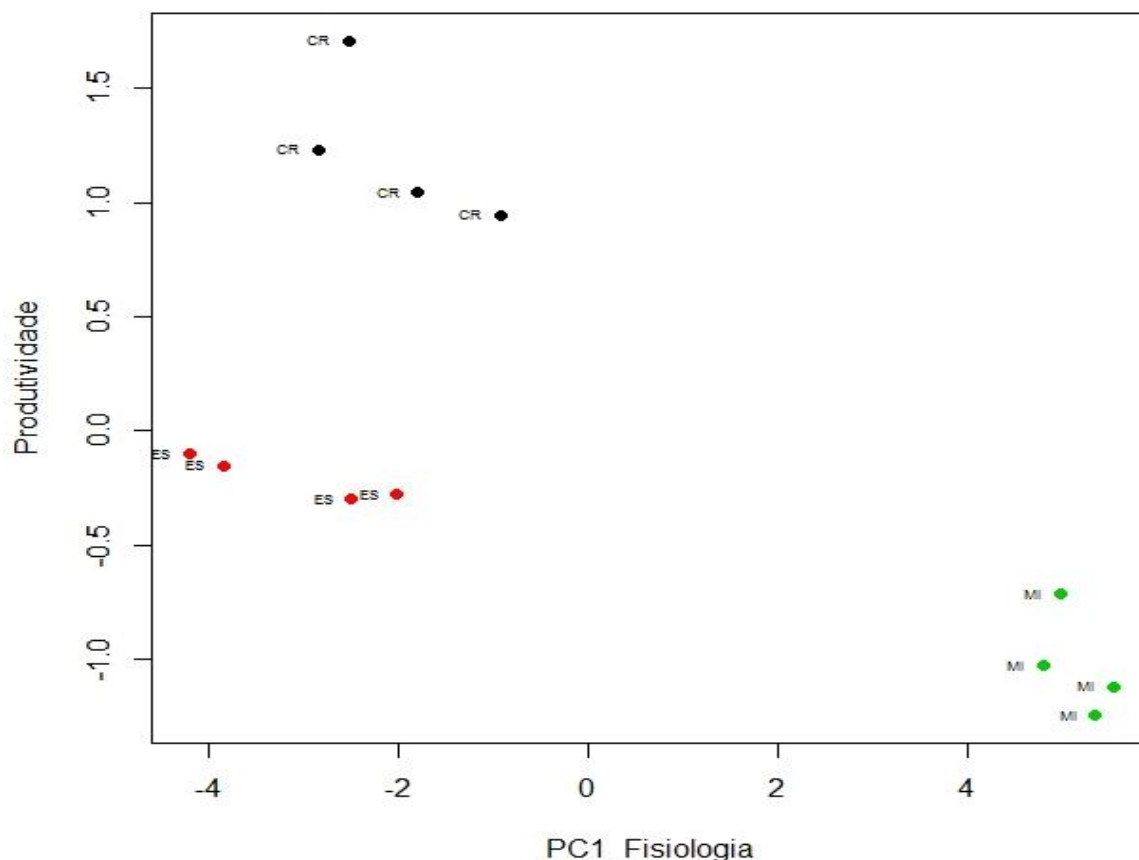
Com base nos dados apresentados na Tabela 16, o Ψ_w foi a variável de maior expressão nesta componente, seguido do IAF, TRA, sendo todos com carga negativa, e o SPAD foi a variável de menor importância e com carga positiva.

Tabela 16 - Loadings da componente principal 1 (CP1) das variáveis fisiológicas. Botucatu-SP, 2019.

Loadings	CP1
SPAD	0,03
IAF	-0,11
TRA	-0,08
ΨW	-0,99

Os componentes fisiológicos associados aos dados de produtividade da soja se diferiram quanto ao sistema de manejo, conforme pode ser visto na Figura 7. No tratamento envolvendo milheto (MI) na rotação de culturas a PC1_Fisiologia assumiu valores positivos combinados com valores negativos de produtividade. Isso significa que quando o ΨW , IAF e o TRA na planta foram baixos e o SPAD foi alto, houve baixa produtividade de soja neste sistema de manejo, contudo, vale ressaltar que o ΨW foi o que influenciou este resultado.

Figura 7 - Dispersão das observações na componente principal 1 (PC1_Fisiologia) das variáveis fisiológicas. Botucatu-SP, 2019. MI: sistema de rotação de cultura com milho; CR: sistema de rotação de cultura com crotalária; ES: sistema de manejo com escarificação do solo a cada três anos.



No sistema com escarificação do solo (ES) as componentes PC1_Fisiologia e a produtividade assumiram valores negativos, ou seja, quando, principalmente, o ΨW nas plantas foi maior, houve queda na produtividade da soja.

Também houve comportamento diferente na associação das variáveis fisiológicas com a produtividade no sistema com rotação de culturas com crotalária durante o cultivo de primavera (CR). Neste sistema, a PC1_Fisiologia teve valores negativos relacionados com valores altos de produtividade, neste caso indicando que a maior produtividade neste sistema foi possível quando a planta apresentou alto ΨW .

Assim, pode-se afirmar que o comportamento das variáveis fisiológicas combinadas com a produtividade foi diferente para cada sistema de manejo. Pode

ser que tal comportamento possa estar associado com a quantidade e qualidade de palha formada por cada cultura e com os diferentes sistemas radiculares que estas espécies apresentam. Todavia, vale ressaltar que a correlação entre tais variáveis não foi tão expressiva, apresentando um valor moderado de -0,69 (Figura 12).

As diferenças encontradas entre os sistemas de manejos em função das variáveis fisiológicas também podem ser observadas na Tabela 17.

Tabela 17 - Teste de média por análise univariada da componente principal 1 das variáveis fisiológicas. Botucatu-SP, 2019.

Sistema de manejo	Componente principal 1
Milheto	5,16 a
Crotalaria	-2,02 b
Escarificação	-3,13 b

Médias seguidas por letras iguais minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Student (LSD) ao nível de 5% de probabilidade.

Para os dados de raiz (área radicular – ARAD, diâmetro médio – DIAM, densidade radicular – DRAD e massa seca de raiz – MSR), também foram obtidos os autovalores e seus respectivos autovetores para a análise de componentes principais a partir da matriz de correlação entre todos os pares desta variável. A Tabela 18 contém os agrupamentos formados e as respectivas porcentagens de variâncias explicadas.

Tabela 18 - Componentes principais (CP) das variáveis de raiz e variância explicada. Botucatu-SP, 2019.

CP	Variância explicada (%)	Variância acumulada (%)
PC1	99,99	99,99
PC2	$8,80 \times 10^{-6}$	99,99
PC3	$5,82 \times 10^{-6}$	100
PC4	$6,79 \times 10^{-9}$	100

Conforme dados da Tabela 18, a primeira componente formada pelos agrupamentos das variáveis de raiz (PC1_Raiz), representa praticamente totalidade da variabilidade total dos dados, não sendo necessário explorar mais de uma componente.

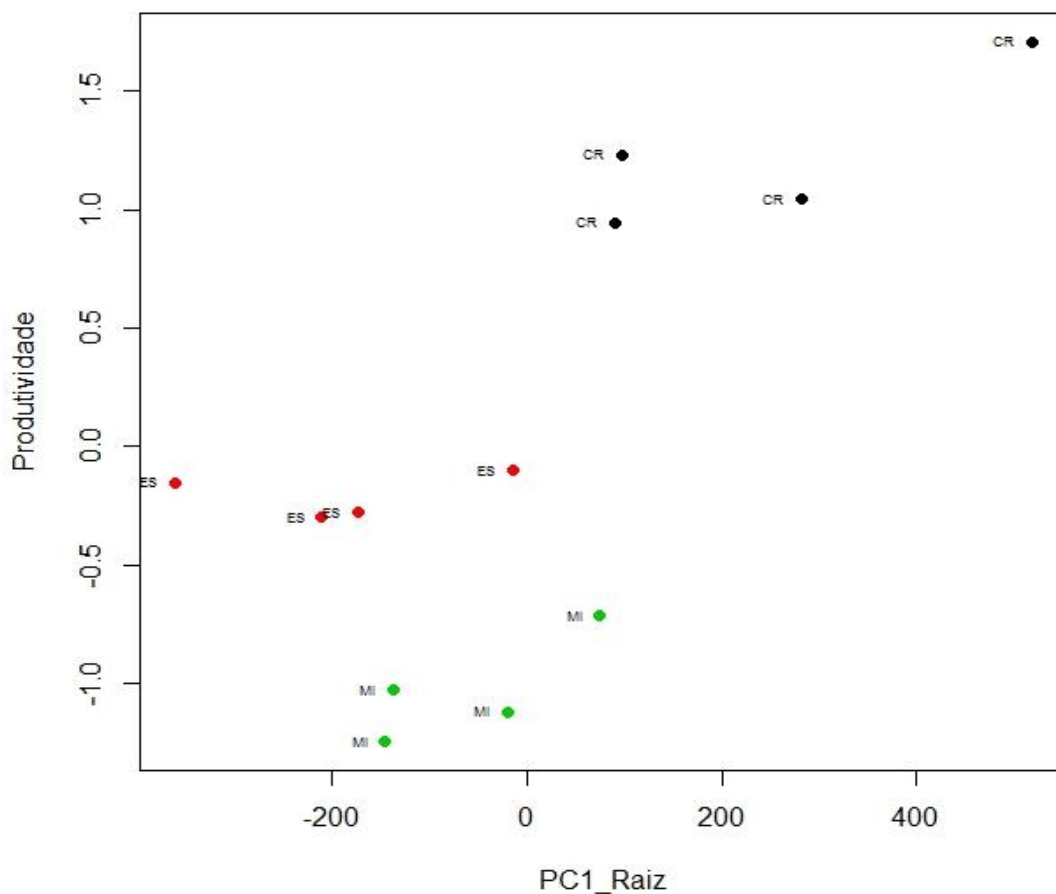
A expressividade desta componente está totalmente relacionada com os dados de MSR (Tabela 19), sendo a significância das demais variáveis irrisória.

Tabela 19 - *Loadings* da componente principal 1 (CP1) das variáveis de raiz. Botucatu-SP, 2019.

Loadings	CP1
ARAD	$4,76 \times 10^{-4}$
DIAM	$8,05 \times 10^{-6}$
DRAD	$1,38 \times 10^{-3}$
MSR	$9,99 \times 10^{-1}$

Ao relacionar a PC1_Raiz com a produtividade foi possível distinguir os sistemas de manejo (Figura 8). Sendo que o MI e o ES assumiram valores negativos de produtividade e PC1_Raiz, neste caso, conforme apresentado na Tabela 19, a baixa produtividade está relacionada com a baixa MSR. A baixa produção de MSR pode ter reduzido à absorção de nutrientes, comprometendo o desenvolvimento da planta e, conseqüentemente, a produtividade. O comportamento destas variáveis no sistema CR foi o similar ao MI e ao ES, porém, o CR teve alta produtividade associada à alta PC1_Raiz (alta MSR).

Figura 8 - Dispersão das observações na componente principal 1 (PC1_Raiz) das variáveis de raiz. Botucatu-SP, 2019. MI: sistema de rotação de cultura com milho; CR: sistema de rotação de cultura com crotalária; ES: sistema de manejo com escarificação do solo a cada três anos.



Os resultados encontrados pelo teste de média, feito por meio da análise variância univariada estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Teste de média por análise univariada da componente principal 1 das variáveis de raiz. Botucatu-SP, 2019.

Sistema de manejo	Componente principal 1
Milho	-56,83 ab
Crotalária	246,78 a
Escarificação	-189,95 b

Médias seguidas por letras iguais minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Student (LSD) ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis de física do solo (resistência do solo à penetração - RP, porosidade total - PT, macroporosidade - Mp, microporosidade - mp e densidade

do solo – Ds), também foram submetidas à análise de componentes principais, obtendo assim os agrupamentos e as respectivas porcentagens de variância explicada (Tabela 21).

Tabela 21 - Componentes principais (CP) das variáveis de física do solo e variância explicada. Botucatu-SP, 2019.

CP	Variância explicada (%)	Variância acumulada (%)
PC1	98,80	98,80
PC2	$8,27 \times 10^{-3}$	99,63
PC3	$2,81 \times 10^{-3}$	99,91
PC4	$8,71 \times 10^{-4}$	99,99
PC5	$1,16 \times 10^{-7}$	100

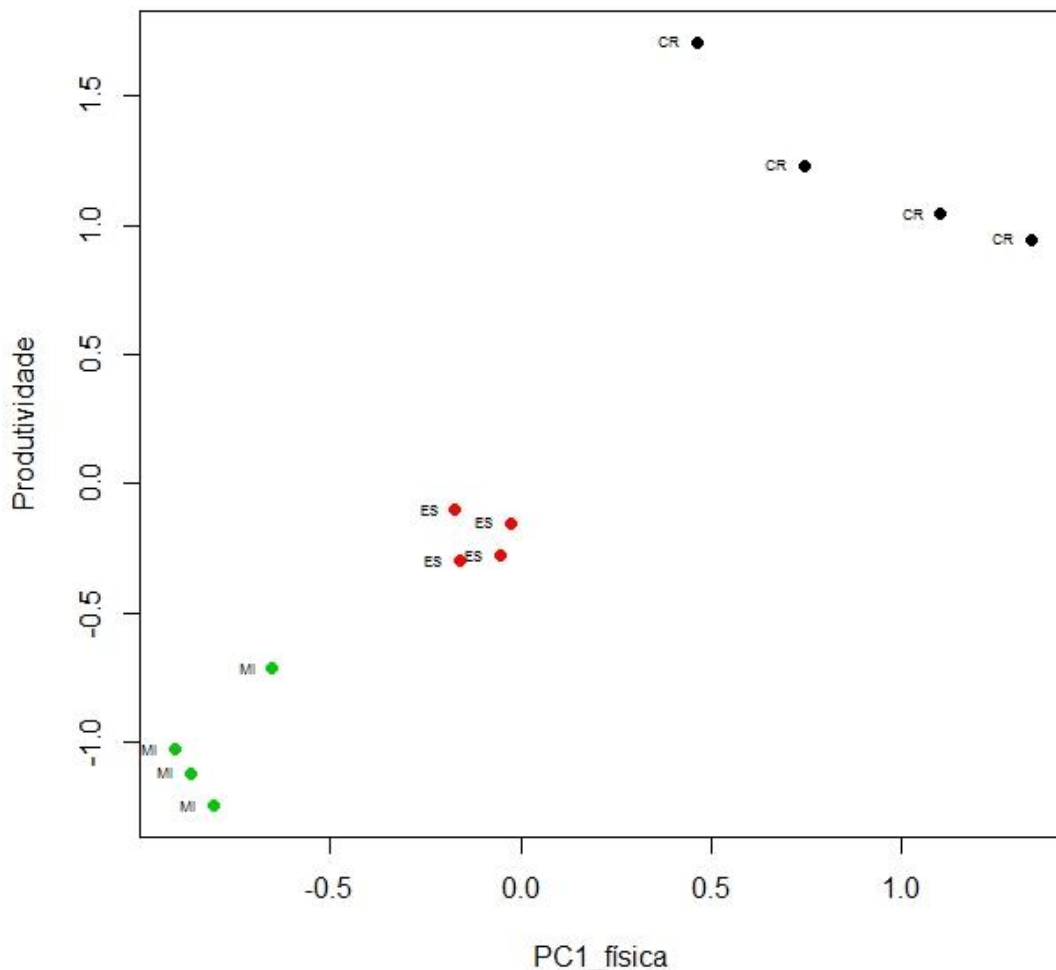
Como pode ser observado na Tabela 21, apenas a PC1 das variáveis de física do solo (PC1_Física) representa quase totalidade da variabilidade total dos dados, portanto, para fins de exploração dos resultados será considerada apenas esta componente. Na qual a variável com maior expressividade é a RP (Tabela 22).

Tabela 22 - Loadings da componente principal 1 (CP1) das variáveis de física do solo. Botucatu-SP, 2019.

Loadings	CP1
RP	0,99
PT	-0,01
Mp	0,01
Mp	-0,02
Ds	-0,00

Observando a dispersão dos tratamentos na Figura 9, percebe-se que também houve diferença entre os tratamentos. O sistema MI e ES assumiram valores negativos para PC1_Física e produtividade. Baixo PC1_Física implica em baixa RP (Tabela 22), portanto, houve baixa produtividade nestes sistemas quando os valores de RP foram baixos. Já no sistema CR a alta produtividade associou com altos valores de PC1_Física, ou seja, principalmente com altos valores de RP.

Figura 9 - Dispersão das observações na componente principal 1 (PC1_Física) das variáveis de física do solo. Botucatu-SP, 2019. MI: sistema de rotação de cultura com milho; CR: sistema de rotação de cultura com crotalária; ES: sistema de manejo com escarificação do solo a cada três anos.



Os resultados observados na Figura 9, também podem ser notados na Tabela 23, por meio da ANOVA e teste de média de Student.

Tabela 23 - Teste de média por análise univariada da componente principal 1 das variáveis de física do solo. Botucatu-SP, 2019.

Sistema de manejo	Componente principal 1
Milho	-0,81 c
Crotalária	0,91 a
Escarificação	-0,08 b

Médias seguidas por letras iguais minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Student (LSD) ao nível de 5% de probabilidade.

As variáveis de água no solo também foram submetidas à análise de componentes principais. Para este grupo foram consideradas as seguintes variáveis: capacidade máxima de armazenamento de água do solo – CAD, infiltração acumulada – IA, velocidade de infiltração básica– VIB, água armazenada 1 dia após a chuva – AA1DAC, água armazenada 3 dias após a chuva – AA3DAC, água armazenada 5 dias após a chuva – AA5DAC, água armazenada 8 dias após a chuva – AA8DAC e água armazenada 15 dias após a chuva – AA15DAC. Os agrupamentos e suas respectivas porcentagens de variância estão apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Componentes principais (CP) das variáveis de água e variância explicada. Botucatu-SP, 2019.

CP	Variância explicada (%)	Variância acumulada (%)
PC1	97,99	97,99
PC2	$1,96 \times 10^{-2}$	98,01
PC3	$4,07 \times 10^{-4}$	98,01
PC4	$1,72 \times 10^{-5}$	98,01
PC5	$4,07 \times 10^{-7}$	98,01
PC6	$1,77 \times 10^{-7}$	98,01
PC7	$4,04 \times 10^{-8}$	98,01
PC8	$3,84 \times 10^{-9}$	98,01

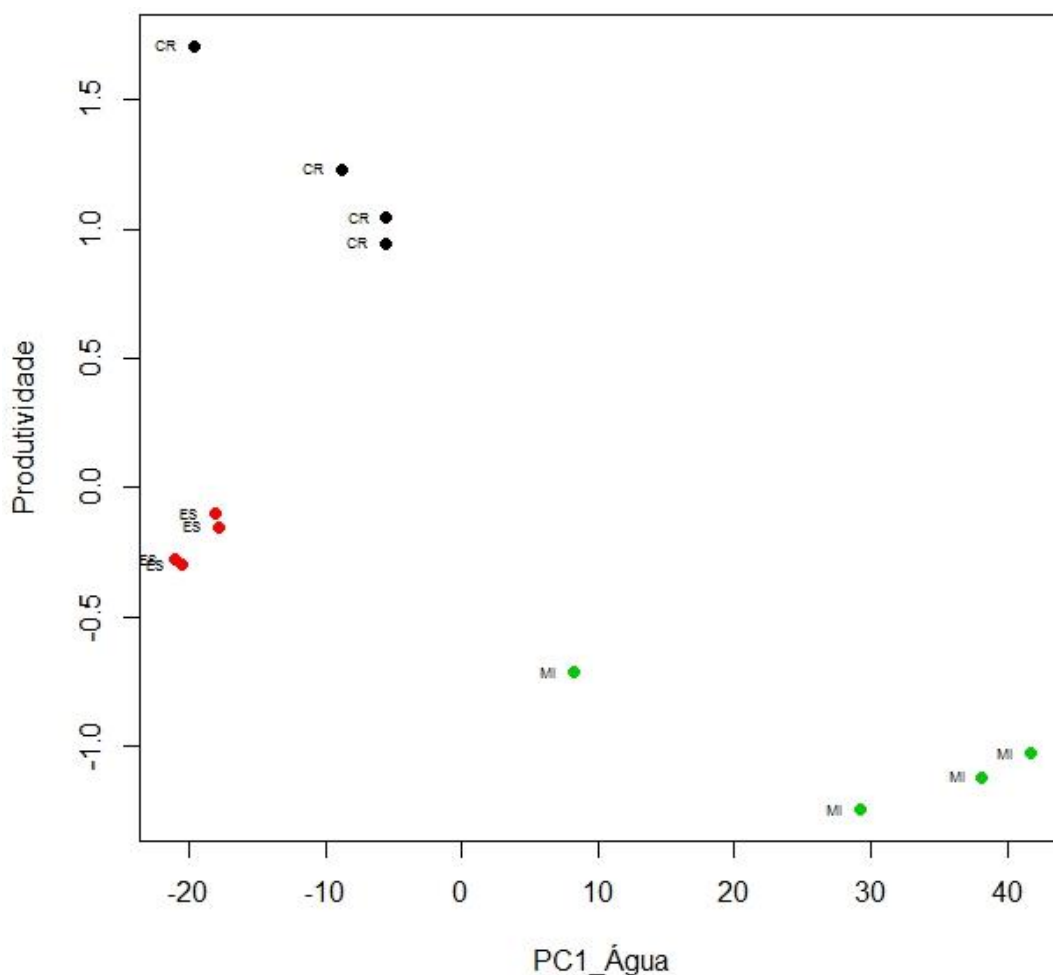
Para interpretação dos resultados será considerada apenas a primeira componente (PC1_Água), pois explica quase 98% da variância total. Nesta componente a IA foi a variável que expressou maior peso (Tabela 25), seguida da VIB, e as demais características avaliadas quase não contribuíram na expressividade da CP1_Água.

Tabela 25 - Loadings da componente principal 1 (CP1) das variáveis de água no solo. Botucatu-SP, 2019.

<i>Loadings</i>	CP1
CAD	$2,68 \times 10^{-5}$
IA	$-9,99 \times 10^{-1}$
VIB	$-3,42 \times 10^{-2}$
AA1DAC	$9,89 \times 10^{-4}$
AA3DAC	$1,47 \times 10^{-3}$
AA5DAC	$1,54 \times 10^{-3}$
AA8DAC	$2,33 \times 10^{-3}$
AA15DAC	$1,46 \times 10^{-3}$

Com base nos resultados apresentados na Figura 10, notou-se a diferença entre os manejos de primavera em função das variáveis de água e produtividade. No MI a produtividade assumiu valores negativos, e a PC1_Água valores positivos, enquanto que no tratamento CR a produtividade assumiu valores positivos associados com valores negativos de PC1_Água. Tal associação em ambos os tratamentos indica que a alta produtividade nestes sistemas está relacionada com alta infiltração de água no solo. Todavia, tratamento ES apresentou comportamento totalmente oposto aos demais, assumindo valores negativos nas duas componentes, sendo assim a baixa produtividade foi associada a maior infiltração de água.

Figura 10 - Dispersão das observações na componente principal 1 (PC1_Água) das variáveis de água no solo. Botucatu-SP, 2019. MI: sistema de rotação de cultura com milho; CR: sistema de rotação de cultura com crotalária; ES: sistema de manejo com escarificação do solo a cada três anos.



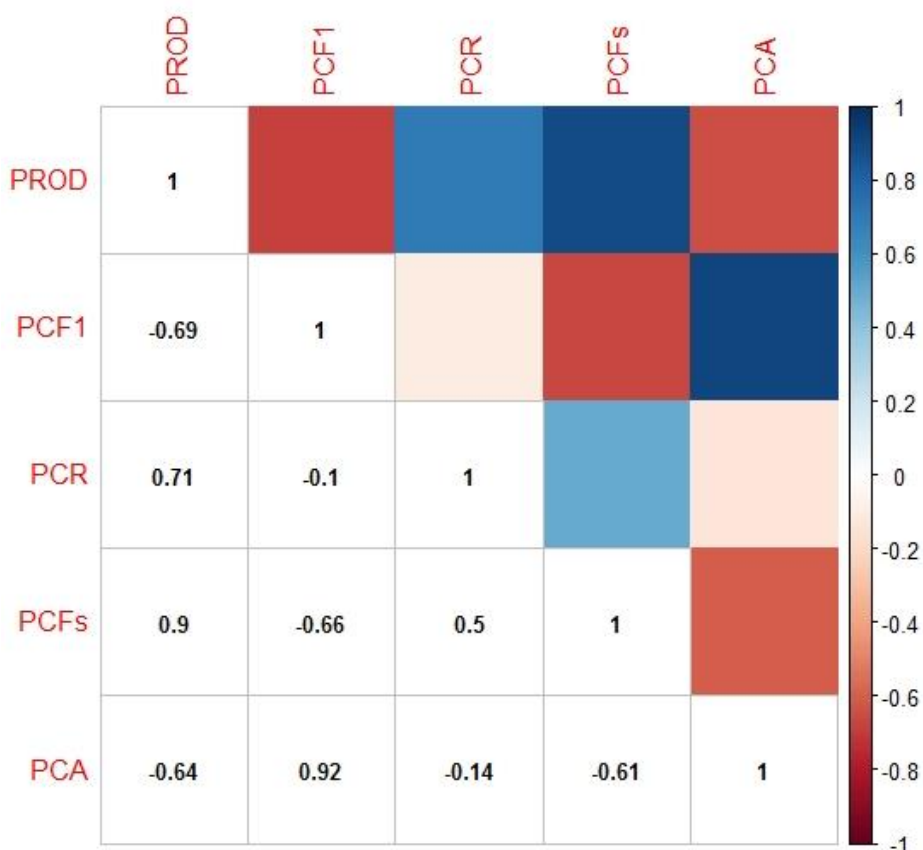
Por meio da ANOVA e teste de média de Student também foi possível notar diferença entre os tratamentos (Tabela 26).

Tabela 26 - Teste de média por análise univariada da componente principal 1 das variáveis de água. Botucatu-SP, 2019.

Sistema de manejo	Componente principal 1
Milho	29,30 a
Crotalária	-9,90 b
Escarificação	-19,39 b

Médias seguidas por letras iguais minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Student (LSD) ao nível de 5% de probabilidade.

Figura 12 - Correlação de Pearson entre os componentes principais de maior expressividade de cada conjunto de variável. Botucatu-SP, 2019. PROD: produtividade; PCF1: componentes das variáveis fisiológicas; PCR: componentes das variáveis de raiz; PCFs: componentes das variáveis de física do solo; PCA: componentes das variáveis de água no solo.



As PCs apresentaram correlação de moderada a muito forte com a produtividade, variando de -0,64 a 0,9, contudo, a única PC que teve correlação muito forte (0,9) com a produtividade foi à relacionada com as propriedades físicas do solo (PCFs).

Sendo assim, valores altos de RP (valores positivos de PC1_Física) resultam em melhor produtividade. Contudo vale ressaltar que este experimento foi conduzido sobre sistema de semeadura direta de longo prazo (MI e CR), em que provavelmente já tenha uma rede de poros bem estruturada e com continuidade, desta forma não sendo tão afetado pelos altos valores de RP. Tendo em vista que em SSD normalmente os valores de RP são mais elevados dos que os encontrados em SPC.

2.4 CONCLUSÕES

A produtividade da soja é dependente das propriedades físicas do solo, de fatores fisiológicos da planta, da capacidade de armazenamento de água no solo e do desenvolvimento radicular da planta. Porém a física do solo é o fator que mais correlaciona com a produtividade da cultura.

O sistema de semeadura direta conduzido há 32 anos proporcionou maior produtividade da cultura da soja.

REFERÊNCIAS

- BATISTELA, G. C.; PADOVANI, C. R. Diferenciação de grupos de eucaliptos por procedimentos uni e multivariado. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v.30, n.3, p.242-248, 2015.
- BERNARDO, S; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. Ed. Atual e Ampliada, Viçosa: UFV, 2006. 625p.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2.ed. Madison : America Society of Agronomy, 1986. p. 363-375.
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Pesquisa do Solo. **Manual de métodos de análises de solo**. Brasília, DF, 2017. 573 p.
- FERNANDES, F. B. P.; LACERDA, C. F.; ANDRADE, E. M.; NEVES, A. L. R.; SOUSA, C. H. C. Efeito de manejos do solo no déficit hídrico, trocas gasosas e rendimento do feijão-de-corda no semiárido. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 46, n. 3, p. 506-515, 2015.
- GALDOS, M. V.; PIRES, L. F.; COOPER, H. V.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A.; MOONEY, S. J. Assessing the long-term effects of zero-tillage on the macroporosity of Brazilian soils using X-ray Computed Tomography. **Geoderma**, Amsterdam, v. 337, n. 1-2, p. 1126-1135, 2019.
- GOUVÊA, M. A.; PREARO, L. C.; ROMEIRO, M. C. Avaliação da adequação de aplicação de técnicas multivariadas em estudos do comportamento do consumidor em teses e dissertações de duas instituições de ensino superior. **Revista de Administração**, São Paulo, v.47, n.2, p.338-355, 2012.
- HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados**. 5ª ed. Porto Alegre, Brasil, 2005. 593p.
- HAIR, J. F.; BLOCK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise Multivariada de Dados**. Tradução de Adonai Schlup Sant'Anna. 6ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688p.

JAMAUX, I.; STEINMETZ, A.; BELHASSEN, E. Looking for molecular and physiological markers of osmotic adjustment in sunflower. **New Phytologist**, Cambridge, v. 137, n. 1, p. 117-127, 1997.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. New Jersey: Pearson, 2007. 773p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações**. 2ª ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319 p.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada**: uma abordagem aplicada. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2013. 295p.

REEVE, M.J.; CARTER A.D. Water release characteristic. In: SMITH K.A. et al. **Soil analysis**: physical methods. New York: Marcel Dekker, 1991. p.111-160.

RIGON, J. P. G; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A.; LA SCALA, N. Cover crop rotations in no-till system: short-term CO₂ emissions and soybean yield. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 75, n 1, p. 18-26, 2018.

SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. Soil analysis: **Physical methods**. Marcel Dekker, Inc., New York. 1991.

SOARES, M. D. R.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; CUNHA, J. M.; SANTOS, L. A. C.; FONSECA, J. S.; DE SOUZA, Z. M. Atributos físicos do solo em áreas sob diferentes sistemas de usos na região de Manicoré, AM. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v.59, n.1, p.9-15, 2016.

WATSON, D. J. Comparative physiological studies on the growth of field crops. I - Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, Londres, v.11, n. 1, p.41-76, 1947a.

WATSON, D. J. Comparative physiological studies on the studies on the growth of field crops. II – The effect of varying nutrient supply on net assimilation rate and leaf area. **Annals of Botany**. Londres, v.11, n. 44, p. 375-407, 1947b.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em sistemas conservacionistas de manejos do solo de longa duração há melhor estruturação do solo, e que apesar das camadas superficiais apresentarem maior densidade e resistência do solo à penetração das raízes, isso não prejudica a produtividade, o desenvolvimento radicular e a infiltração de água no solo. Nesses sistemas há melhor armazenamento de água no solo e disponibilidade desta às plantas, refletindo em um sistema com menor risco de déficit hídrico e consequentemente menor risco de produção.

A análise multivariada dos dados possibilita compreender melhor o comportamento das variáveis e sua influencia na produtividade das culturas agrícolas. Sendo a produtividade dependente de fatores fisiológicos, fitotécnicos e das propriedades físico-hídricas do solo, no entanto, a física do solo é o fator com maior correlação. Contudo, esta característica na maioria das vezes é negligenciada nos ambientes de produção agrícola, sendo talvez este um dos principais motivos para a estagnação na produtividade da soja e de outras culturas.

REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, N.A.; MOSES, V.; PRAKASH, C.S. The impact of possible climate changes on developing countries. **GM Crops & Food**, Tuskegee, v. 5, n. 2, p. 77-80, 2014.
- BAYER C.; SCHENEIDER, N. G. Plantio direto e o aumento do conteúdo de matéria orgânica do solo em pequenas propriedades rurais no município de Teutônia. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 29, n. 1, p. 1655-166, 1999.
- BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, 301 C. M. A.; SOUZA, F. R. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférrico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n.3, p. 681-91, 2010.
- BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 124, n. 1-2, p. 3-22, 2005.
- CALONEGO, J.C., RAPHAEL, J.P.A., RIGON, J.P.G., OLIVEIRA NETO, L.de, ROSOLEM, C.A. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal Agronomy**, Amsterdam, v.87, p.37-37, 2017.
- CHUNG, H.; GROVE, J. H.; SIX, J. Indications for soil carbon saturation in temperate agroecosystem. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, n. 4, p.1132-1139, 2008.
- COSTA, F. S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; FONTOURA, S. M. V. Aumento de matéria orgânica num Latossolo bruno em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.2, p.587-589, 2004.
- DEXTER, A. R.; CZYZ, F. A.; RICHARD, G; RESZKOWSKA, A. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 143, n. 1-2, p. 243-253, 2008.
- DOMIT, L. A.; OKUMURA, R. S.; BARBOSA, G. M. de C.; HIGASHIBARA, L. R.; DALBOSCO, M.; MARIANO, D. de C.; ZORZENONI, T. O. GUIMARÃES, M. de F. Tempo de adoção do sistema plantio direto e a relação com atributos do solo. **Revista Agrarian**, Dourados, v. 7, n. 26, p. 560-569, 2014.
- DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA/ASA, Special Publication, nº 35, 1994, p. 3-21.
- EDWARDS, A. P.; BREMNER, J.M. Microaggregates in soils. **European Journal of Soil Science**, Reino Unido, v. 18, n. 1, p. 64-73, 1967.

FEBRAPDP. Federação Brasileira de Plantio Direto na palha. **Evolução do plantio direto no Brasil**. 2018. Disponível em: <https://febrapdp.org.br/download/area-PD-Brasil-e-estados.pdf>. Acesso em: 14 maio. 2019.

FEBRAPDP. Federação Brasileira de Plantio Direto na palha. **Evolução do plantio direto no Brasil**. 2012. Disponível em: <http://www.febrapdp.org.br>. Acesso em: 14 maio. 2019.

FLOWERS, M. D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 48, p.21-35, 1998.

FOSTER, K.; LAMBERS, H.; REAL, D.; RAMANKUTTY, P.; CAWTHRAY, G. R.; RYAN, M. H. Drought resistance and recovery in mature *Bituminaria bituminosa* var. albomarginata. **Annals of Applied Biology**, Reino Unido, v. 166, n. 1, p. 154-169, 2015.

GOLCHIN, A.; BALDOCK, J. A.; OADES, J. M. A model linking organic matter decomposition, chemistry and aggregate dynamics. In: LAL, R.; KIMBLE, J.; FOLLETT, R.F.; STEWART, B. A. (eds). **Soil processes and the carbon cycle**. Boca Raton, CRC Press, 1998. p. 245-266.

HU, L.; WANG, Z.; HUANG B. Diffusion limitations and metabolic factors associated with inhibition and recovery of photosynthesis from drought stress in C3 perennial grass species. **Physiologia Plantarum**, Reino Unido, v. 139, n. 1, p. 93-106, 2010.

LEAL, A. J. F.; LAZARINI, E.; RODRIGUES, L. R.; MURAISHI, C. T.; BUZETTI, S.; MASCARENHA, H. A. A. Aplicação de calcário e culturas de cobertura na implantação do sistema plantio direto em cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2771- 2777, 2008.

MILLER, R. M.; JASTROW, J. D. Hierarchy of root and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation. **Soil Biology and Biochemistry**, Reino Unido, v. 22, n. 5, p. 579-584, 1990.

MORAES, M. T. **Qualidade física do solo sob diferentes tempos de adoção e de escarificação do sistema de plantio direto e sua relação com a rotação de cultura**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2013.

PETRY, M. T.; ZIMMERMMANN, F. L.; CARLESSO, R.; MICHELON, C. J.; KUNZ, J. H. Disponibilidade de água do solo ao milho cultivado sob sistemas de semeadura direta e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 531-539, 2007.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M., eds. **Tópicos Ciência do Solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 5, p.49-134.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um podzólico vermelho-escuro de Eldorado do Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19; n. 2, p. 313-319, 1995.

SALVO, L.; HERNÁNDEZ, J.; ERNST, O. Distribution of soil organic carbon in different size fractions, under pasture and crop rotations with conventional tillage and no-till systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 109, n. 2, p. 116–122, 2010.

SCHJONNING, P.; MUNKHOLM, L. J.; ELMHOLT, S.; OLESEN, J. E. Organic matter and soil tilth in arable farming: Management makes a difference within 5-6 years. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 122, n. 2, p. 157-172, 2007.

SCHOENHOLTZ, S.H.; VAN MIEGROET, H.; BURGER, J. A. 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 138, n. 1-3, p. 335-356, 2000.

SHI, J.; YASUOR, H.; YERMIYAHU, U.; ZUO, Q.; BENGAL, A. Dynamic responses of wheat to drought and nitrogen stresses during re-watering cycles. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 146, p. 163-172, 2014.

SHICK, J.; BERTOL, I.; BATISTELA, O.; BALBINOT JR, A. A. Erosão hídrica em cambissolo húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. Perdas de solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 427-436, 2000.

SILVA, A. R.; DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P. Avaliação da intensidade de tráfego e carga de um forwarder sobre a compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 3, p.547-554, 2011.

SORATTO, R.P. PEREZ, A.A.G., FERNANDES, A.M. Age of No-Till System and Nitrogen Management on Common Bean Nutrition and Yield. **Agronomy Journal**, Amsterdam, v. 106, n. 3, p.809-820, 2014.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro – 1: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 207-212, 2002.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Editora: Artmed, 2013. 954 p.
TAKAHASHI, S.; BADGER M. R. Photoprotection in plants: a new light on photosystem II damage. **Trends in Plant Science**, Amsterdam, v. 16, n. 1, p. 53-60, 2011.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Resistência do solo a penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 725-730, 2001.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **European Journal of Soil Science**, Reino Unido, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciado por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 301-309, 1998.

XU, Z.; ZHOU, G.; SHIMIZU, H. Are plant growth and photosynthesis limited by predrought following rewatering in grass? **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 60, n. 3, p. 3737-3749, 2009.