**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Influência de plantas de cobertura no balanço de água no solo sob
rotação de culturas em plantio direto e preparo convencional**

Camila Cassante de Lima

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de
Plantas

**Piracicaba
2020**

Camila Cassante de Lima
Engenheira Agrônoma

**Influência de plantas de cobertura no balanço de água no solo sob rotação de culturas
em plantio direto e preparo convencional**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **PAULO LEONEL LIBARDI**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de
Plantas

Piracicaba
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Lima, Camila Cassante

Influência de plantas de cobertura no balanço de água no solo sob rotação de culturas em plantio direto e preparo convencional / Camila Cassante de Lima. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2020. 139 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Dinâmica da água no solo 2. Evapotranspiração 3. Drenagem interna 4. Feijão 5. *Phaseolus vulgaris* L. 6. Tríticale 7. *Triticosecale rimpaui* I. Título

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Sonia e Ricardo, a minha profunda gratidão pela lição de vida, dedicação, apoio, compreensão e auxílio, que me fortalecem a cada dia;

Ao meu irmão, Felipe, pelo amor, carinho e confiança;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi, pela orientação, pelos ensinamentos, pela paciência e dedicação.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida e pela oportunidade de concluir mais uma etapa da minha formação acadêmica, me guiando para superar as dificuldades que surgiram no meio do caminho e sempre me dando forças para continuar seguindo meus sonhos.

Aos meus pais, por estarem sempre ao meu lado, me apoiando nos momentos difíceis e que me possibilitaram a oportunidade de realizar esta conquista. Ao Thiago Cassundé, e aos demais familiares, irmão, avós, tias e primas que sempre me apoiaram e motivaram.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), pela oportunidade que me foi concedida.

Ao Instituto Agronômico – Campinas/SP, pela concessão da área experimental.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

À Fundação Agrisus, pelo financiamento do projeto de pesquisa.

Ao Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi, pela orientação e conhecimentos transmitidos.

À Dra. Isabella Clerici De Maria, pela parceria e concessão do experimento pertencente as áreas da Conservação do Solo do Instituto Agronômico – Campinas/SP.

Às amigas que fiz durante o curso de doutorado: Aline Martineli Batista; Cezar Augusto Medeiros Rebouças; Fernando Setti Gimenes; Francisco Bernardo Dias; Gabriela Hellmeiter; Ismael Meurer; Maria Laiane do Nascimento Silva; Thaís Nascimento Pessoa; Tamires Teles de Souza; Verena Benício Oliveira.

Em especial, aos meus amigos Ismael Meurer e Maria Laiane do Nascimento Silva que sempre se dispuseram a me ajudar efetivamente em dúvidas teóricas.

A todos do Instituto Agronômico de Campinas, que de alguma forma ajudaram em meu experimento: André Luiz Barros de Oliveira Silva; Antonio Ribeiro de Sousa, Camila Cassiana de Lima, Isabella Lucon, Maria Elizabete Alves de Freitas, Ruth Fazio, Wellington da Silva Guimarães Júnnyor.

Aos funcionários do CEC (Centro Experimental Central) da Fazenda Santa Elisa do Instituto Agronômico, Osvaldo Nunes de Freitas e Carlos Fernandes, que me auxiliaram em todas as operações agrícolas necessárias em meu experimento.

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	11
1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. PLANTAS DE COBERTURA EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO	17
2.2 BALANÇO DE ÁGUA NO SOLO	21
2.3 PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO E SUA INFLUÊNCIA NA ARMAZENAGEM E NA EVAPORAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO	29
3. MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	31
3.2 HISTÓRICO DA ÁREA EXPERIMENTAL	33
3.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E CARACTERIZAÇÃO DOS TRATAMENTOS	35
3.4 PLANTAS DE COBERTURA E POUSSIO	36
3.5 CULTURA DO FEIJÃO (<i>PHASEOLUS VULGARIS</i> L.), VARIEDADE IAC SINTONIA	39
3.5.1 Semeadura	39
3.5.2 Tratos culturais	40
3.6 CULTURA DO TRITICALE (<i>TRITICOSECALE RIMPAUI</i> L.), VARIEDADE IAC 5 CANINDÉ	41
3.6.1 Semeadura	41
3.6.2 Tratos culturais	42
3.7 AMOSTRAGEM DE SOLO	42
3.8 AVALIAÇÕES NO SOLO	43
3.8.1 Análise química	43
3.8.2 Análise granulométrica	44
3.8.3 Densidade dos sólidos, densidade do solo e porosidade	44
3.8.4 Resistência do solo à penetração	45
3.8.5 Curva de retenção	47
3.8.6 Condutividade hidráulica do solo	48
3.11 MASSA SECA DAS PLANTAS DE COBERTURA	59
3.12 COMPONENTES DE RENDIMENTO DAS CULTURAS DO FEIJÃO (<i>PHASEOLUS VULGARIS</i> L.) E DO TRITICALE (<i>TRITICOSECALE RIMPAUI</i> L.)	59
3.13 ANÁLISE DOS DADOS	60
4. RESULTADOS	61
4.1 ALTERAÇÕES NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO	61
4.2 BALANÇO DE ÁGUA NO SOLO	72
4.2.1 Plantas de cobertura	72
4.2.2 Cultura do feijão	78
4.2.3 Cultura do triticale	87
5. CONCLUSÕES	95
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
REFERÊNCIAS	99
APÊNDICES	113

RESUMO

Influência de plantas de cobertura no balanço de água no solo sob rotação de culturas em plantio direto e preparo convencional

Foi realizado experimento em um Latossolo Vermelho Distrófico argiloso a muito argiloso no Centro Experimental Central do Instituto Agronômico em Campinas, São Paulo, com o objetivo de avaliar a influência de plantas de cobertura no balanço de água no solo de uma cultura de verão (feijão) e uma cultura de inverno (triticale) sob plantio direto consolidado e preparo convencional do solo recém mobilizado e avaliar atributos físicos do solo dos diferentes sistemas de produção agrícola utilizados. O delineamento experimental em blocos casualizados foi composto por três blocos com parcelas subdivididas, sendo o fator da parcela o manejo do solo (plantio direto e preparo convencional) e o fator da subparcela a cobertura do solo (gramínea, leguminosa e pousio). As parcelas experimentais foram instrumentalizadas com tensiômetros às profundidades de 0,70 e 0,90 m. O balanço de água no solo foi realizado em períodos de tempo de aproximadamente 15 dias, num volume de solo delimitado pela superfície do solo a profundidade de 0,80 m, englobando o ciclo do feijão e o ciclo do triticale. Para estimar a drenagem interna foi calculada diariamente a densidade de fluxo de água na profundidade considerada, pela equação de Darcy-Buckingham. Para isso foram obtidas curvas de retenção da água no solo e foi medida a condutividade hidráulica em função do conteúdo de água no solo pelo método do perfil instantâneo. A evapotranspiração foi determinada por diferença, como incógnita da equação simplificada do balanço de água no solo. Foram também avaliadas a eficiência do uso da água pelas culturas do feijão e do triticale, os componentes de rendimento destas culturas e a produção de matéria seca das plantas de cobertura. Os atributos físicos do solo avaliados foram: densidade do solo, porosidade, macroporosidade, microporosidade e resistência do solo à penetração das raízes. Os resultados obtidos mostraram que: os resíduos culturais da espécie de leguminosa sobre a superfície do solo no plantio direto promoveu menor densidade do solo e menor resistência do solo à penetração das raízes e maior porosidade total e macroporosidade, indicando melhorias das propriedades físicas do solo em relação à sua incorporação no preparo convencional. Na cultura de verão (feijão), a maior perda de água por drenagem interna ocorreu no preparo convencional sob pousio e a manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo não significou aumento de evapotranspiração e de produtividade da cultura. A menor utilização de água em profundidade pela cultura do triticale (ascensão capilar) ocorreu nos tratamentos que utilizaram planta de cobertura gramínea. Maior evapotranspiração e maior produtividade em termos médios, foram encontradas em pousio sob plantio direto e preparo convencional, indicando que o déficit hídrico da estação modifica o balanço de água no solo de culturas de inverno.

Palavras-chave: Dinâmica da água no solo, Evapotranspiração, Drenagem interna, Feijão, *Phaseolus vulgaris*, Triticale, *Triticosecale rimpaui*

ABSTRACT

Influence of cover plants on water balance in the soil under no-tillage and conventional tillage crop rotation

An experiment was carried out on a clayey to very clayey Rhodic Hapludox soil at the Central Experimental Center of the Agronomic Institute in Campinas, São Paulo, with the aim of evaluating the influence of cover plants on soil water balance processes, of a summer crop (bean) and a winter crop (triticale) under consolidated no-tillage and conventional tillage and also evaluating the physical attributes of the soil of the different agricultural production systems used. The randomized block experimental design was composed of three blocks with subdivided plots. The plot factor was soil management (no-tillage and conventional tillage) and the subplot factor was soil cover (grass, legume and fallow). The experimental plots were instrumented with tensiometers at depths of 0.70 and 0.90 m. The soil water balance was carried out over periods of approximately 15 days in a volume of soil delimited by the soil surface and the depth of 0.80 m, including the bean and the triticale cycles. To estimate the internal drainage, the water flow density was calculated daily at the considered depth, by the Darcy-Buckingham equation. For this, soil water retention curves were determined and the soil hydraulic conductivity as function of soil water content was evaluated by the instantaneous profile method. Evapotranspiration was determined by difference as unknown of the simplified no lateral water flow equation of soil water balance. The water use efficiency by bean and triticale crops, the yield components of these crops and dry matter yield of cover plants was also evaluated. The soil physical attributes evaluated were: bulk density, porosity, macroporosity, microporosity and soil resistance to penetration. The results obtained showed that: the maintenance of crop residues of the legume species on the soil surface under no-tillage promoted lesser bulk density and soil penetration resistance and greater total porosity and macroporosity, indicating better conditions to the soil physical properties in relation to their incorporation in the soil under conventional tillage. In the bean crop, the greatest internal drainage occurred in conventional tillage under fallow and the maintenance of crop residues on the soil surface did not necessarily meant higher evapotranspiration and crop productivity; in triticale crop, the lower use of water in depth (capillary rise) occurred in treatments that used grass cover plants. Higher evapotranspiration and higher productivity in average terms, were found in the fallow areas under no-tillage and conventional tillage, indicating that the water deficit in the winter season changes the soil water balance.

Keywords: Soil water dynamics, Evapotranspiration, Internal drainage, Bean, *Phaseolus vulgaris*, Triticale, *Triticosecale rimpaui*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudo, na Estação Experimental Central do Instituto Agronômico (Fazenda Santa Elisa), no município de Campinas, SP.	31
Figura 2. Precipitação e temperatura média no período de condução do experimento (CIIAGRO, 2019).....	32
Figura 3. Aplicação de calcário em área total.	34
Figura 4. Preparo do solo com grade aradora no tratamento Preparo Convencional (PC).	35
Figura 5. Croqui da área experimental.	36
Figura 6. Tratamentos em Preparo Convencional do solo (PC). (A): Com palha incorporada (gramínea e leguminosa. (B): Sem palha incorporada (pousio).....	35
Figura 7. Detalhes do plantio do sorgo-forrageiro como planta de cobertura gramínea.	37
Figura 8. Detalhes do plantio do feijão-de-porco como planta de cobertura leguminosa.	37
Figura 9. Estado de desenvolvimento das plantas de cobertura, momento no qual foi realizado o manejo químico e mecânico. (A): Sorgo-forrageiro. (B): Feijão-de-porco.	38
Figura 10. Infestação de plantas daninhas nos tratamentos sob pousio. (A): PC-Pousio. (B): PD-Pousio.	38
Figura 11. (A): Penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSUCAR. (B): Penetrômetro de bancada CT3TM Texture Analyzer.	46
Figura 12. (A): Coluna de solo delimitada no campo e trincheira circular para introdução da chapa galvanizada. (B): Chapa galvanizada introduzida no solo.	48
Figura 13. Tensiômetros instalados no centro da circunferência.	49
Figura 14. (A): Saturação do perfil. (B): Colocação da lona plástica para evitar a evaporação e a entrada de água através da superfície.	49
Figura 15. Esquema ilustrativo dos componentes do balanço de água no solo do presente estudo, em que P é a Precipitação; ET é a evapotranspiração real; AC é a ascensão capilar; D é a drenagem interna e Δh_L é a variação de armazenagem de água no perfil de 0 a L m de profundidade.	53
Figura 16. Componentes do tensiômetro com manômetro de mercúrio.	54
Figura 17. (A): Disposição dos tensiômetros em relação a planta (B): Manchão de borracha colocado nos tensiômetros para evitar o fluxo preferencial de água.	55
Figura 18. Esquema ilustrativo da disposição dos tensiômetros com manômetro de mercúrio em cada parcela experimental.	56
Figura 19. (A): Médias da resistência do solo à penetração dos tratamentos experimentais antes do preparo do solo. (B): Conteúdo de água no solo no momento de execução do ensaio de resistência do solo à penetração. Barras horizontais em cada ponto indicam o intervalo de confiança da média ($p \leq 0,10$).	61

- Figura 20. (A):** Médias da resistência do solo à penetração dos tratamentos experimentais após o preparo do solo. **(B):** Conteúdo de água no solo no momento de execução do ensaio de resistência do solo à penetração. Barras horizontais em cada ponto indicam o intervalo de confiança da média ($p \leq 0,10$).63
- Figura 21.** Médias da microporosidade do solo na camada de 0,10-0,20 m de profundidade nos tratamentos experimentais ao final do ciclo das plantas de cobertura. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.65
- Figura 22.** Médias da resistência do solo à penetração nos tratamentos experimentais ao final do ciclo das plantas de cobertura. **(A):** camada de 0,00-0,05 m de profundidade. **(B):** camada de 0,10-0,20 m de profundidade. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.66
- Figura 23.** Médias dos atributos físicos do solo na camada 0,20-0,30 m de profundidade nos tratamentos experimentais ao final do ciclo da cultura do triticale. **(A):** densidade do solo. **(B):** porosidade. **(C):** macroporosidade. **(D):** resistência do solo à penetração. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.69
- Figura 24.** Médias da microporosidade na camada de 0,05-0,10 m de profundidade nos tratamentos experimentais ao final do ciclo da cultura do triticale. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.71
- Figura 25.** Médias da massa seca das plantas de cobertura nos tratamentos experimentais. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.73
- Figura 26.** Densidade de fluxo média da água no solo na profundidade de 0,70 m e precipitação durante o período de desenvolvimento das plantas de cobertura nos tratamentos experimentais.74
- Figura 27. (A):** Médias do número de plantas de feijão nos tratamentos experimentais. **(B):** Valores médios do número de vagens de feijão nos tratamentos experimentais. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.79
- Figura 28.** Médias de produtividade da cultura do feijão nos tratamentos experimentais. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.81
- Figura 29.** Densidade de fluxo média da água no solo na profundidade de 0,80 m e precipitação durante o período de desenvolvimento da cultura do feijão nos tratamentos experimentais.82
- Figura 30.** Médias da drenagem interna nos tratamentos experimentais no ciclo da cultura do feijão. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.85
- Figura 31.** Médias da eficiência de uso da água da cultura do feijão nos tratamentos experimentais. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.86
- Figura 32. (A):** Médias do número de plantas de triticale nos tratamentos experimentais. **(B):** Valores médios da produtividade da cultura do triticale nos tratamentos experimentais. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.88

Figura 33. Densidade de fluxo média da água no solo na profundidade de 0,8 m e precipitação durante o período de desenvolvimento da cultura do triticale nos tratamentos experimentais.89

Figura 34. Médias da eficiência de uso da água da cultura do triticale nos tratamentos experimentais. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização granulométrica das camadas do Latossolo Vermelho Distrófico férrico localizado no Centro Experimental Central do Instituto Agronômico (Fazenda Santa Elisa).	32
Tabela 2. Histórico de plantio da área experimental.	33
Tabela 3. Média dos atributos químicos nas camadas de solo dos tratamentos sob plantio direto, em junho de 2018.	34
Tabela 4. Densidade superficial de plantas daninhas (número de indivíduos por m ²).	39
Tabela 5. Tratos culturais realizados durante o ciclo da cultura do feijão, variedade Sintonia-IAC.	41
Tabela 6. Média dos atributos químicos do solo após calagem e adubação das culturas dos tratamentos sob plantio direto e preparo convencional do solo em julho de 2019.	43
Tabela 7. Períodos de avaliação do balanço de água no solo.	51
Tabela 8. Sub-períodos de avaliação do balanço de água no solo.	58
Tabela 9. Efeito simples do preparo do solo nas médias da macroporosidade e da resistência do solo à penetração ao final do ciclo das plantas de cobertura nas camadas avaliadas.	64
Tabela 10. Efeito simples de cobertura do solo nas média da microporosidade e da resistência do solo à penetração ao final do ciclo das plantas de cobertura nas camadas avaliadas.	64
Tabela 11. Efeito simples do preparo do solo nas médias da densidade, porosidade, macroporosidade e resistência do solo à penetração ao final do ciclo da cultura do feijão nas camadas avaliadas.	67
Tabela 12. Efeito simples da cobertura do solo nas médias da microporosidade e da resistência do solo à penetração ao final do ciclo da cultura do feijão nas camadas avaliadas.	68
Tabela 13. Efeito simples do preparo do solo nas médias da macroporosidade e da microporosidade ao final do ciclo da cultura do triticale nas camadas avaliadas.	68
Tabela 14. Média da drenagem interna/ascensão capilar (D/AC), variação da armazenagem de água no solo (Δh) e evapotranspiração real (ET_r) por sub-período integrado (1, 2 e 4) para o ciclo das plantas de cobertura nos tratamentos experimentais. Os valores de precipitação pluvial (P) nos períodos 1, 2 e 3 foram 120,4 mm, 2,4 mm e 59,6 mm, respectivamente.	75
Tabela 15. Média dos valores totais da drenagem interna (D), variação de armazenagem (Δh) da água no solo e evapotranspiração (ET_r) das plantas de cobertura nos tratamentos experimentais, no período 25/10/2018 a 23/10/2018. A precipitação pluvial (P) neste período foi de 182,4 mm.	76
Tabela 16. Efeito simples da cobertura do solo nas médias da drenagem interna (D), variação de armazenagem da água no solo (Δh) e evapotranspiração (ET_r) das plantas de cobertura.	77
Tabela 17. Efeito simples de preparo do solo nas médias da evapotranspiração (ET_r) das plantas de cobertura.	77
Tabela 18. Efeitos simples do preparo e da cobertura do solo nas médias do número de vagens de feijão.	79

Tabela 19. Média da drenagem interna/ascensão capilar (D/AC), variação da armazenagem de água no solo (Δh) e evapotranspiração real (ET_r) por sub-período integrado (1, 2, 3 e 4) para o ciclo da cultura do feijão nos tratamentos experimentais. Os valores de precipitação pluvial (P) nos períodos 1, 2, 3 e 4 foram 83,3 mm, 54,5 mm, 199,9 mm e 43,2 mm, respectivamente.83

Tabela 20. Média dos valores totais da drenagem interna (D), variação de armazenagem (Δh) da água no solo e evapotranspiração (ET_r) da cultura do feijão nos tratamentos experimentais, no período de 12/01/2019 a 21/03/2019. A precipitação pluvial (P) neste período foi de 380,9 mm.....84

Tabela 21. Média da drenagem interna/ascensão capilar (D/AC), variação da armazenagem de água no solo (Δh) e evapotranspiração real (ET_r) por sub-período integrado (1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7) para o ciclo da cultura do triticle nos tratamentos experimentais. Os valores de precipitação pluvial (P) nos períodos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 foram 19,6 mm, 26,5 mm, 0,0 mm, 0,0 mm, 60,8 mm, 0,0 mm e 8,4 mm, respectivamente.89

Tabela 22. Média dos valores totais da drenagem interna (D), variação de armazenagem (Δh) da água no solo e evapotranspiração (ET_r) da cultura do triticle nos tratamentos experimentais. O valor da precipitação pluvial (P) no período foi de 115,3 mm.90

1. INTRODUÇÃO

O uso de áreas nas regiões tropicais e subtropicais para o cultivo convencional de culturas tem ocasionado diminuição do potencial produtivo dos solos agrícolas. A movimentação intensa do solo e a reposição inadequada dos nutrientes exportados pelas culturas podem constituir-se em fatores limitantes para a manutenção e o aumento da produtividade, levando à degradação do solo decorrente do manejo inadequado (BAYER et al., 2004; BERTIN et al., 2005; ANDRIOLI; PRADO, 2012).

Diante disso, surgiu o sistema plantio direto (SPD), um manejo conservacionista que contribui efetivamente para a produção agrícola sustentável (JUSTES, 2017), pois envolve a manutenção de resíduos vegetais de espécies antecessoras na superfície do solo, conhecidas como plantas de cobertura, e, posteriormente, há o estabelecimento de culturas mediante mobilização do solo exclusivamente na linha de semeadura (KOCHHANN; DENARDIN, 2000; DALMAGO, 2004; NUNES et al., 2006), excluindo, desta forma, práticas de revolvimento do solo (gradagem, aração, subsolagem e escarificação) adotadas em solos manejados convencionalmente (BAYER et al., 2004; BERTIN et al., 2005; TORRES et al., 2008).

Plantas de cobertura são incorporadas à rotação do sistema de cultivo por causa de suas supostas contribuições potenciais à conservação do solo e da água (SHARMA; IRMAK, 2017). Segundo Alvarenga et al. (1995) e Campos et al. (1995), a proteção da superfície do solo com resíduos vegetais é o manejo mais recomendado para a proteção e a conservação do solo, pois minimiza as perdas de solo por erosão devido à diminuição do impacto das gotas de chuva, reduzindo o escoamento e o selamento superficial do solo. Contribui, ainda com uma maior infiltração de água, melhoria na condução e armazenagem de água (ESHEL et al., 2015; YU et al., 2016) bem como numa melhor distribuição de água no perfil do solo (ALONSO-AYUSO et al., 2014). Embora haja estudos que confirmem estes efeitos, deve-se levar em consideração que estas mudanças no solo ocorrem de forma lenta e gradual e que a sua magnitude depende do clima e do solo (MEYER et al., 2019).

Entre as inúmeras alterações provocadas pela adoção do uso de plantas de cobertura, a modificação da dinâmica da água no solo é de especial importância pois, nos últimos anos, as mudanças climáticas têm provocado irregularidade na distribuição das chuvas, retardando a época de semeadura das safras principais e aumentando os riscos de perdas das culturas por déficit hídrico, o que acarreta em maiores desafios para a gestão do uso da água (SHARMA; IRMAK, 2017; MEYER et al., 2019). Portanto, o impacto das plantas de cobertura no

armazenamento de água no solo e na disponibilidade de água para as plantas depende das condições climáticas, do solo e do manejo da área e pode ser positivo, neutro ou negativo (UNGER; VIGIL, 1998).

Estudos relatam que as plantas de cobertura reduzem a evaporação da água no solo e aumentam a transpiração da cultura em sucessão, aumentando a evapotranspiração em comparação com o solo que permanece em pousio na entressafra (QI et al., 2011a; NIELSEN et al., 2015a). Além do efeito no consumo de água pelas culturas, estudos relataram que as plantas de cobertura reduzem a drenagem de água (MEISINGER et al., 1991; JUSTES et al., 2012), enquanto outros não relataram mudanças significativas (QI et al., 2011b; WARD et al., 2012). Desta forma, torna-se difícil chegar a um consenso sobre o impacto das plantas de cobertura nos fatores que influenciam o balanço de água.

Face à importância da agricultura no cenário brasileiro, torna-se necessário a quantificação de parâmetros envolvidos nas relações hídricas das culturas de interesse econômico pois, o fator água é fundamental no desenvolvimento de uma cultura, e afeta, principalmente, o desenvolvimento de raízes, e a absorção de nutrientes pelas plantas (REICHARDT et al., 1979). Assim, a caracterização do comportamento hídrico das culturas fornece elementos essenciais para o estabelecimento ou aprimoramento de práticas de manejo agrícola que visam a otimização da produtividade, além de atender a várias áreas da ciência agrônoma como a de melhoramento vegetal, a agrometeorologia e a irrigação.

De acordo com Reichardt et al. (1979), estas relações hídricas têm sido estudadas por meio de balanços hídricos, baseados principalmente em informações obtidas na atmosfera, deixando para um segundo plano informações edáficas. Segundo os mesmos autores, estudos da dinâmica da água em condições de campo, com ênfase a fluxos de água na zona radicular, têm sido relegados a um plano secundário devido à grande complexidade dos procedimentos experimentais necessários. O estudo completo do balanço de água num volume de controle do solo envolve todos os processos pertinentes: precipitação, irrigação, evapotranspiração, deflúvio superficial e subsuperficial, drenagem interna, ascensão capilar e variação de armazenagem (LIBARDI, 2012).

Todavia há carência de informações, principalmente no Estado de São Paulo, com base em experimentos sobre o consumo de água ou evapotranspiração real de culturas de verão e inverno utilizando plantas de cobertura distintas. Assim, a previsão de perdas de água por evaporação da superfície e/ou drenagem interna a partir de resíduos de plantas de cobertura nas entressafras permitiria a contabilização do uso da água em sistemas de cultivo durante todo o ano. Nesse sentido, obter o máximo rendimento de grãos aliado a uma prática de manejo que

alcance, além de economia, uma máxima eficiência do uso da água seria de grande importância não somente econômica, mas também ambiental.

Isto posto, a hipótese deste trabalho é: i) a palhada de gramínea e de leguminosa sobre a superfície do solo no sistema de plantio direto promove melhorias das propriedades físicas do solo, redução da drenagem interna, aumento da evapotranspiração e da produtividade das culturas em sucessão em relação a palhada incorporada ao solo no preparo convencional; ii) no solo sob pousio, a drenagem interna é maior, com menor armazenagem da água no solo e evapotranspiração e, por consequência, menor produtividade das culturas do feijão e do triticle tanto sob plantio direto quanto no preparo convencional.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de plantas de cobertura em processos do balanço de água em um Latossolo Vermelho em rotação de culturas sob sistema de plantio direto e preparo convencional e avaliar os atributos físicos do solo dos diferentes sistemas de produção agrícola utilizados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Plantas de Cobertura em Sistema de Plantio Direto

A degradação dos solos nos trópicos devido ao uso contínuo com culturas anuais tem ocasionado diminuição do potencial produtivo dos solos agrícolas. A movimentação intensa do solo no preparo convencional e a reposição inadequada dos nutrientes exportados podem constituir-se em fatores limitantes para a manutenção e o aumento da produtividade, levando à degradação gradativa do solo decorrente do manejo inadequado (BAYER et al., 2004; BERTIN et al., 2005).

Entre os sistemas de manejo do solo que vêm sendo difundidos na agricultura, com o intuito de evitar a degradação do solo por processos erosivos e decomposição da matéria orgânica, está o sistema de plantio direto (SPD), que exclui práticas de revolvimento do solo (gradagem, aração, subsolagem e escarificação) adotadas em solos manejados convencionalmente (BAYER et al., 2004; BERTIN et al., 2005; TORRES et al., 2008).

Com o surgimento de informações técnicas geradas pela pesquisa e o entendimento dos princípios científicos envolvidos, o conceito inicial de SPD foi ampliado e passou a envolver também a manutenção de resíduos vegetais de espécies antecessoras na superfície do solo e o estabelecimento das culturas mediante mobilização de solo exclusivamente na linha de semeadura (KOCHHANN; DENARDIN, 2000; DALMAGO, 2004; NUNES et al., 2006). Para Schnepf e Cox (2006) as plantas de cobertura são descritas como “plantas cultivadas principalmente com o objetivo de proteger e melhorar o solo nas entressafras”.

Segundo Alvarenga et al. (1995) e Campos et al. (1995), a manutenção da superfície do solo com resíduos vegetais é o manejo mais recomendado para a proteção e a conservação do solo pois, minimiza as perdas de solo por erosão hídrica. Os resíduos, quando mantidos sobre a superfície do solo, evitam o impacto direto das gotas da chuva que são interceptadas antes de atingirem o solo, prevenindo a desagregação e reduzindo o selamento e o escoamento superficial do solo.

A palhada ainda cria um ambiente favorável às condições físicas, químicas e biológicas do solo, contribuindo para o controle de plantas daninhas, reduzindo as perdas de matéria orgânica por erosão e mineralização microbiológica, sobretudo nos períodos de excesso ou escassez de água, resultando em benefícios para a cultura posterior, além de auxiliar na estabilização da produção e na recuperação ou manutenção da qualidade do solo (KASPAR; SINGER, 2011; CHATTERJEE, 2013; TRIBOUILLOIS et al., 2015).

Neste sentido, a eficácia da adoção de sistemas de manejo com semeadura direta na palha está relacionada, entre outros fatores, ao acúmulo e qualidade do material vegetal na superfície do solo, produzidos por plantas de cobertura, sobre o qual será semeada ou plantada a cultura seguinte (TORRES, 2003). No entanto, segundo Bertin et al. (2005), o SPD não deve ser visto como uma receita universal, mas como um sistema que exige adaptações locais.

Na região sul do Brasil, o plantio direto é um sistema difundido com muitos estudos já realizados com plantas de cobertura de inverno quanto à proteção do solo, quanto às características das plantas e quanto ao fornecimento de nutrientes, dentre outros fatores (BASSO; REINERT, 1998; AITA et al., 2004; KIELING, 2007; CRUSCIOL et al., 2008; ANDREOTTI et al., 2008). No entanto, no Estado de São Paulo, essa prática ainda é pouco difundida e as áreas cultivadas permanecem em pousio na entressafra, muitas vezes em razão do desconhecimento por parte de técnicos e produtores rurais quanto à eficácia, tratamentos culturais e viabilidade econômica do uso de plantas de coberturas para a manutenção do potencial produtivo do solo (CALEGARI, 2004; ANDREOTTI et al., 2008).

Além da falta de informações técnico-científicas para embasar o uso de plantas de cobertura na entressafra em áreas cultivadas no Estado de São Paulo, o predomínio de altas temperaturas aumenta a velocidade de decomposição do material vegetal e dificulta a produção de palha em quantidade adequada para a cobertura do solo (BERTIN et al., 2005; ANDREOTTI et al., 2008).

Portanto, torna-se necessário o conhecimento da espécie vegetal a ser utilizada como plantas de cobertura no período de primavera-verão, antecedendo as culturas principais ou de “safrinha” (CAMPOS et al., 1995; BERTIN et al., 2005; ANDREOTTI et al., 2008). Segundo Alvarenga et al. (2001) e Chaves e Calegari (2001), a produção de material pelos resíduos vegetais para manter a superfície do solo coberta depende das condições de fertilidade do solo, da capacidade de adaptação a baixos valores de pH do solo (ERNANI et al., 2001), das condições climáticas, edáficas e fitossanitárias (AMADO et al., 2002) e principalmente das características da planta de cobertura (SODRÉ FILHO et al., 2004).

Entre as espécies utilizadas, destacam-se as gramíneas e as leguminosas. As gramíneas colaboram na manutenção de níveis maiores de matéria orgânica no solo, comparadas às leguminosas, devido a sua alta relação C/N e ao alto teor de lignina na sua composição, formando húmus de maior estabilidade, porém podem apresentar problemas em relação à disponibilidade de N (BULISANI; ROSTON, 1993). As leguminosas, devido a sua menor relação C/N, decompõem-se rapidamente, no entanto, possuem capacidade de fixação simbiótica do N₂ atmosférico e, por isso, fornecem maiores quantidades de N ao solo e à cultura

seguinte. Porém, para o máximo aproveitamento do N, é importante que a liberação do nutriente dos resíduos culturais ocorra em sincronia com a demanda do elemento pela cultura (STUTE; POSNER, 1995). O fornecimento de N pelas leguminosas se torna importante não apenas pela economia na adubação nitrogenada, mas também pela redução do potencial de poluição das águas subterrâneas por N de origem mineral.

A qualidade do resíduo vegetal, principalmente sua relação C/N, influencia diretamente a taxa de decomposição e imobilização/mineralização do N (MURAOKA et al., 2002) e, conseqüentemente, o aproveitamento do N destes resíduos pela cultura (LARA CABEZAS et al., 2004; FIGUEIREDO et al., 2005).

Dentre as espécies regulares, que podem variar em função da região e da época de semeadura (outono e primavera), destacam-se como gramíneas: milheto, aveia preta e sorgo-forrageiro. E, como leguminosas de verão: mucuna-preta, feijão-bravo-do ceará, crotalária, feijão-guandu e feijão-de-porco (BERTIN et al., 2005; ANDRIOLLI; PRADO, 2012; OLIVEIRA, 2015). Segundo Argenta et al. (2001), o uso de espécies leguminosas é pouco utilizado como cobertura durante o inverno, por limitações como crescimento inicial lento, maior custo de aquisição de sementes em relação a outras espécies e a alta taxa de decomposição de seus resíduos.

Segundo Carvalho e Sodr Filho (2000), as espécies utilizadas como cobertura do solo devem apresentar ainda, rusticidade, crescimento inicial rápido e alta produção de material vegetal na época da seca. O sucesso do plantio direto depende da manutenção de sistemas capazes de gerar quantidades de matéria seca suficientes para manter o solo coberto durante todo o ano, o que significa que áreas destinadas às culturas de primavera-verão não devem permanecer em pousio durante o inverno (CERETTA et al., 2002). Conforme Alvarenga et al. (2001), 6 Mg ha⁻¹ de matéria seca na superfície é quantidade suficiente para se obter boa cobertura do solo.

Vários estudos têm demonstrado os efeitos benéficos da produção de palha para a cobertura do solo (BERTOL et al., 1998; AITA et al., 2001; AITA; GIACOMINI, 2003; TORRES et al., 2005; ESPNDOLA et al., 2006; BOER et al., 2007; GAMA-RODRIGUES et al., 2007). No entanto, a escolha da espécie que será semeada em sucessão é também determinante no sucesso do sistema plantio direto (ARGENTA et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2002).

O SPD, quando bem manejado, tem proporcionado produtividade de culturas superior à de outros sistemas de cultivo, como o sistema convencional e o cultivo mínimo, pois as plantas de cobertura melhoram as propriedades do solo beneficiando a produtividade da cultura em

sucessão sem aumentar os custos, acumulam material vegetal sobre o solo e, posteriormente, liberam nutrientes no solo pela decomposição da palhada (FERNANDES et al., 1998). Além disso, quando bem gerenciadas, as plantas de cobertura também reduzem a lixiviação de nitrato e aumentam o efeito do adubo verde, o que eleva o conteúdo de nitrogênio no solo nos sistemas de cultivo (TOSTI et al., 2014; TRIBOUILLOIS et al., 2015) e aumentam o conteúdo de carbono nos solos que ajudam a mitigar os efeitos das mudanças climáticas (POEPLAU; DONON, 2015).

Avaliando diferentes plantas de cobertura no estado de Minas Gerais, Camargo e Piza (2007) observaram que a aveia preta apresentou a maior produtividade de palhada, seguida pela aveia branca, nabo forrageiro e braquiária, que não diferiram entre si. Este resultado comprova a afirmação de Floss (2002), de que a aveia preta se destaca dentre as culturas de inverno em produção de matéria seca para formação de palhada. Embora a aveia preta tenha grande histórico de uso como planta de cobertura e de sucessão à cultura principal, Sodré Filho et al. (2004) não observaram boa adaptação às condições de entressafra do Cerrado, quanto à produção de biomassa e cobertura do solo.

Em experimento, Nunes et al. (2006) obtiveram maior produtividade de feijão em parcelas sob planta de cobertura gramínea, que também produziram quantidade suficiente de matéria seca para viabilizar o sistema de plantio direto. Oliveira et al. (2002) observaram que o rendimento de grãos do feijão foi influenciado por diferentes palhadas das plantas de cobertura no sistema plantio direto, sendo mais afetado pela espécie produtora de palha (gramínea/leguminosa) do que pela sua forma de cultivo (exclusivo/consorciado).

Quanto à produção de palhada pelas plantas de cobertura, Torres et al. (2005) verificaram que as gramíneas apresentaram maior produção total de matéria seca em relação às leguminosas tanto em condições de déficit hídrico quanto em condições adequadas de conteúdo de água no solo. Já Perin et al. (2004), avaliando a produção de palhada de plantas de cobertura, verificaram que a crotalária apresentou produção 108 % superior à da vegetação espontânea e 31% superior à do milheto.

A cobertura do solo tem estreita relação com a estabilidade estrutural do solo, devido à proteção contra o impacto da gota da chuva, manutenção do conteúdo de água no solo e diminuição da amplitude térmica, que favorecem o desenvolvimento da atividade microbiana e do sistema radicular das culturas que, por sua vez, estimulam a agregação do solo (CAMPOS et al., 1995). Neste sentido, as plantas de cobertura modificam o estado hídrico do solo devido às inúmeras alterações no sistema solo-planta-atmosfera que engloba as mudanças nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (DALMAGO, 2004).

Desta forma, o uso de plantas de cobertura tem-se mostrado uma técnica de produção mais sustentável pois reduz os riscos na agricultura, por afetar as relações hídricas do solo ao longo do ano, influenciando a infiltração, reduzindo as perdas por drenagem interna (KASPAR et al., 2001; QI et al., 2011a), diminuindo a evaporação, melhorando o armazenamento (ABAZI et al., 2013; DIETZEL et al., 2016) e alterando os padrões de consumo de água pelas culturas subsequentes (GABRIEL et al., 2014).

Portanto, a avaliação do comportamento hídrico de culturas comerciais, além de determinar o consumo médio de água com a finalidade de projetar sistemas de irrigação, determinam-se também os períodos de escassez de água no solo, que são de grande importância para a seleção de variedades e caracterização do potencial de plantio de acordo com a região, buscando minimizar os custos de produção (VIEIRA, 1984).

Assim, o conhecimento da dinâmica da água no solo em sistemas que utilizam plantas de cobertura permite um melhor entendimento dos efeitos destes impactos na disponibilidade de água no solo para o rendimento de culturas em sucessão (BASCHÉ et al., 2016a; ÇERCIOĞLU et al., 2019). Esta dinâmica tem sido estudada por meio de balanços hídricos, baseados principalmente em informações da atmosfera, deixando para um plano secundário informações do solo devido à grande complexidade dos procedimentos experimentais necessários para avaliação dos fluxos de água na zona radicular (REICHARDT et al., 1979).

2.2 Balanço de Água no Solo

O balanço de água está intimamente relacionado ao balanço de energia. Por muito tempo, a dinâmica da água nos assim chamados sistemas solo-água, solo-planta e solo-atmosfera foi estudada separadamente por pesquisadores das áreas de solo, fisiologia vegetal e agrometeorologia, respectivamente, o que prejudicou os avanços teóricos e práticos (COSTA, 1986).

O desenvolvimento teórico e aplicação de técnicas experimentais levaram ao conhecimento dos processos físicos que envolvem o balanço da água no solo e, por consequência, ao entendimento de como as plantas utilizam a água e de como respondem aos níveis de armazenagem. Portanto, a avaliação dos processos envolvidos no balanço de água no solo pode ser uma saída viável para o estabelecimento de estratégias eficazes de manejo visando uma melhor eficiência do uso da água no solo pelas culturas (ROCHA, 2004).

O movimento da água no solo, na planta e na atmosfera ocorre devido ao decréscimo do potencial total da água em cada segmento, podendo ser descrito por equações de fluxo (RICHARDS, 1931). O potencial total é composto de vários componentes e a importância de cada um deles depende do segmento em estudo.

Equipamentos diversos têm sido construídos para medida direta ou indireta do componente potencial mátrico da água no sistema solo. Sob condições de campo, é comum o uso de tensiômetros e, no laboratório, utilizam-se as câmaras de pressão com placas porosa de Richards e os funis de placa porosa de Haines para determinação da curva de retenção da água no solo, que correlaciona o conteúdo de água no solo com o potencial mátrico da água no solo (LIBARDI, 2012).

As unidades de potencial da água mais utilizadas são as unidades de energia por unidade de massa (Joule Kg^{-1}), por unidade de volume (Joule m^{-3}), ou por unidade de peso (Joule N^{-1}). Por facilidade de medida e cálculo, a unidade de energia por unidade de peso, que resulta numa coluna (altura) de água, é a de maior emprego em cálculos de balanço de água (LIBARDI, 2012).

Assim, o balanço de água no solo considera as condições hídricas num volume de controle de um solo cultivado e representa a contabilização de todas as formas ou processos de entrada (E_a) e saída (S_a) de água durante um determinado intervalo de tempo ($t_2 - t_1$) neste volume de solo (LIBARDI, 2012). Tal volume é definido como a camada de solo, delimitada pela superfície do solo e pela profundidade efetiva das raízes, a qual deve englobar 95% ou mais do sistema radicular ativo (REICHARDT; TIMM, 2004) e está submetida às peculiaridades dos fenômenos meteorológicos, dos atributos do solo e das características genéticas da espécie vegetal. Expressando as quantidades de entrada (E_a) e de saída (S_a) em altura de água, o saldo ou balanço de água nesta camada, para o período considerado, corresponde à variação da armazenagem de água (Δh) (LIBARDI, 2012).

Colocados numa forma de equação de balanço de água, para o intervalo de tempo ($t_2 - t_1$), os valores dos fluxos de entrada (E_a) entram com sinal positivo, sendo eles: a precipitação pluvial (P), a irrigação (I), o deflúvio superficial de entrada (R_e), o deflúvio subsuperficial de entrada (R'_e) e a ascensão capilar (AC). Os valores dos fluxos de saída (S_a), que entram com sinal negativo são: a drenagem interna (D), a evapotranspiração real (ET_r), o deflúvio superficial de saída (R_s) e o deflúvio sub-superficial de saída (R'_s). O balanço ou variação de armazenagem da água no solo e os processos envolvidos, na forma desta equação, têm sido estudados por diversos autores em condições diversificadas (BRITO et al., 2009; MOTA et al., 2010; SILVA et al., 2014; LIBARDI et al., 2015; ZHANG et al., 2016).

A quantidade de água que entra pela superfície superior do volume de controle de solo, a partir da atmosfera, constitui-se da precipitação pluvial e/ou da irrigação principalmente. Dependendo do tipo de solo e da localização no relevo, uma quantidade de água pode também entrar e sair lateralmente, por sobre a superfície do solo (deflúvio superficial) e por debaixo dela (deflúvio subsuperficial) e a quantidade de água que entra pela superfície inferior do volume de controle é denominada de ascensão capilar. Se a quantidade de água que entra no período de tempo considerado for maior que a quantidade que sai durante o mesmo período, o saldo será positivo e, caso contrário, será negativo. Tanto o saldo positivo como o negativo são medidos pela variação da armazenagem de água no perfil do solo no período considerado (LIBARDI, 2012).

Dentre os componentes de entrada da equação do balanço de água no solo, os avaliados com maior facilidade são a precipitação e a irrigação. A primeira medida é simples, e pode ser realizada por pluviômetro com leitura manual ou acoplada a um data logger (CRUZ et al., 2005) e por estações meteorológicas automáticas. Entretanto, em áreas cultivadas nem toda a precipitação incidente chega ao solo, uma vez que parte é interceptada pela planta. A interceptação é a retenção temporária da água das chuvas pelo dossel das plantas, sendo redistribuída no solo através de respingos de água (HELVEY; PATRIC, 1965). A precipitação que atinge o solo é denominada de precipitação efetiva (REICHARDT, 1990).

Embora a precipitação seja uma medida simples, essa entrada de água apresenta grande variabilidade espaço-temporal, cuja estimativa constitui-se numa das principais fontes de erro em planejamentos agropecuários (MOURA et al., 1994), devendo-se desta forma, ser computada na área experimental. Reichardt et al. (1995) estudando a variabilidade diária da chuva em uma área de 1000 ha por um período de um ano, no Município de Piracicaba/SP, verificaram que os dados pluviométricos não foram representativos ($CV > 100\%$) para médias diárias, mensais e trimestrais para distâncias entre 1000 e 2500 m do ponto considerado.

A irrigação consiste na aplicação de água ao solo em quantidade e frequência bem definidos, de maneira a suprir a necessidade das culturas (LIBARDI; SAAD, 1994) de modo a excluir os riscos de perda de produção por deficiência hídrica. Em determinadas regiões, pode ser desconsiderada na equação do balanço de água, desde que as precipitações pluviométricas e/ou ascensão capilar sejam suficientes para atender a demanda de água pela cultura (REICHARDT, 1990; CINTRA et al., 2000; VALNIR JÚNIOR et al., 2001).

Na literatura, encontram-se estudos do balanço de água no solo tanto para condições de sequeiro como irrigados (LIBARDI; SAAD, 1994; MOURA et al., 1994; STONE et al., 2006;

MOTA et al., 2010; CAMPOS et al., 2016) e (REICHARDT et al., 1979; BRITO et al., 2009; ABAZI et al., 2013; SILVA et al., 2014; YANG et al., 2016).

A água proveniente da precipitação efetiva e/ou do sistema de irrigação pode seguir alguns direcionamentos no solo através da infiltração e fluxos da água no perfil do solo (REICHARDT; TIMM, 2004). Em decorrência das forças da gravidade e do gradiente de potencial total, a água desloca-se do local de maior potencial total para aquele de menor potencial total no solo. Assim, o fluxo de água por drenagem interna ou ascensão capilar é determinado diretamente pela equação de Darcy-Buckingham segundo a qual a densidade de fluxo da água (q) é proporcional ao gradiente de potencial total da água ($grad\phi_t$), sendo a condutividade hidráulica do solo (K), função do conteúdo de água (θ), a constante de proporcionalidade (CHILDS, 1971; LIBARDI, 2012). No entanto, devido à complexidade de determinação, essas medidas são geralmente, negligenciadas ou incluídas como parte da armazenagem da água no solo ou da evapotranspiração das culturas (ROSE, 1966).

Para a determinação do gradiente de potencial total da água no solo é necessária a instalação de tensiômetros logo abaixo e logo acima do limite inferior do volume de controle de solo, para determinação do potencial mátrico ao longo do ciclo da cultura. O potencial total da água no solo é a soma do potencial mátrico e do potencial gravitacional, sendo esse último, tomando a superfície do solo como referência gravitacional, a distância da superfície do solo até o centro da cápsula do tensiômetro (LIBARDI, 2012).

Quando a ação da força da gravidade pode ser desprezada devido à secagem do solo, os fenômenos da capilaridade começam a atuar pela matriz do solo para o movimento e a retenção da água. A retenção da água pelo solo contra forças externas é reconhecida como uma das primeiras funções do solo em sustentar o crescimento de plantas sob condições de suprimento de água descontínuo (GROENEVELT; BOLT, 1971).

À medida que o solo seca, há redução da condutividade hidráulica, da taxa de alongação do sistema radicular das culturas, aumento da pilosidade, redução do diâmetro das raízes e redução do contato solo-raiz. Por conseguinte, há redução do potencial mátrico ao redor da raiz, o que reduz o gradiente de potencial total entre a água no xilema e no solo e, provavelmente, ocorre a suberização do sistema radicular (TAYLOR, 1983).

A condutividade hidráulica do solo pode ser estimada pelo método do perfil instantâneo (WATSON, 1966). Hillel et al. (1972) desenvolveram um procedimento detalhado para a utilização deste método sob condições de campo e obtiveram relação exponencial entre a condutividade hidráulica do solo (K) e o conteúdo de água volumétrico (θ). Libardi et al. (1980) simplificaram o método do perfil instantâneo para descrever a condutividade hidráulica do solo

de modo analítico, considerando esta relação exponencial entre K e o θ e que o gradiente de potencial total é unitário. A suposição de gradiente unitário é válida, já que o movimento descendente da água no processo de redistribuição após a saturação do perfil do solo é devido, principalmente, à ação da força gravitacional.

Outro componente da equação do balanço de água que pode ocorrer é quando alguns eventos pluviométricos atingem intensidades maiores que a velocidade de infiltração da água no solo, ocasionando o escoamento por sobre a superfície do solo, processo esse denominado deflúvio superficial (REICHARDT; TIMM, 2004; HILLEL, 2004). O deflúvio depende ainda de elementos da chuva como sua duração e intensidade e de características do solo como declividade, rugosidade, estabilidade estrutural, uso de práticas conservacionistas e textura do solo. A medida do deflúvio superficial no campo é trabalhosa, pois necessita de estrutura para captação da água e, por isso, em função de seus objetivos, muitos estudos utilizam áreas planas que permitem desconsiderar, com segurança, esse componente do balanço de água no solo (REICHARDT et al., 1979; LIBARDI; SAAD, 1994; STONE et al., 2006; BRITO et al., 2009; MOTA et al., 2010).

No método do balanço de água num volume de controle de solo, estima-se, ainda, a evapotranspiração que é a perda combinada de água para a atmosfera, em forma de vapor, através dos processos de evaporação da superfície do solo e transpiração das plantas (STONE; SILVEIRA, 1995). É um processo importante a ser avaliado porque por meio da evapotranspiração e da produtividade da cultura determina-se a eficiência de uso da água pela planta (DOORENBOS; KASSAN, 1979a).

Segundo Lemon (1965), o processo evaporativo da água em solo sem cobertura, submetido a condições atmosféricas constantes, divide-se em três fases. No primeiro estágio, o fluxo de água perdido por evaporação é constante e independe do conteúdo de água no perfil de solo, ou seja, as condições meteorológicas governam o processo. No segundo estágio, as condições do solo comandam a evaporação, sendo a perda da água uma função do conteúdo de água médio no perfil de solo. No terceiro estágio, o fluxo de água é bastante lento e uma fração considerável da água move-se na forma de vapor por difusão (REICHARDT et al., 1972).

A transpiração das culturas é um processo de perda da água pelos organismos vegetais através da cutícula, estômatos, raízes e lenticelas e é governada pela demanda atmosférica e decresce linearmente com o secamento do solo. Desta forma, o processo de evaporação da água no solo e transpiração das culturas ocorrem simultânea e interdependentemente, daí a utilização do termo evapotranspiração (COSTA, 1986).

A comparação da evapotranspiração das culturas sob diferentes condições edafoclimáticas é feita por meio de coeficientes e/ou modelos agrometeorológicos que incluem definições distintas: evapotranspiração potencial de referência (ET_0), máxima (ET_m) e real (ET_r). A ET_0 é o total de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, por unidade de tempo, de uma superfície vegetada em fase de desenvolvimento ativo. É um parâmetro relacionado com o clima e pode ser determinada a partir de dados meteorológicos. A ET_m é a perda de água de uma cultura em condições ótimas, livre de doenças, em solo fértil, sob condições ótimas de solo e sem restrição de água e que alcança a produção máxima de acordo com as condições climáticas predominantes. A ET_r é a perda de água para a atmosfera por evaporação e transpiração de uma cultura, nas condições reais (existentes) de fatores atmosféricos e conteúdo de água no solo, em qualquer estágio de desenvolvimento (STONE; SILVEIRA, 1995).

A evapotranspiração é o componente da equação do balanço que representa maior saída de água do volume de controle de solo (HILLEL, 2004), sendo afetada por variáveis climáticas (radiação solar, temperatura e umidade do ar e velocidade do vento), fatores de cultivo (tipo de cultivo, variedade e estágio fenológico), manejo e condições ambientais (salinidade e baixa fertilidade do solo, camadas adensadas, cobertura e conteúdo de água no solo, densidade de plantas, pragas e doenças) (ALLEN et al., 1998).

A evapotranspiração real não é de fácil obtenção e pode ser realizada por meio de medições diretas ou por meio de estimativas. Dentre os métodos diretos de determinação da evapotranspiração, citam-se o balanço de água no solo e o uso de lisímetros, os quais são utilizados, normalmente, para medida da evapotranspiração em nível experimental, com a utilização de instrumentos especiais (STONE; SILVEIRA, 1995; ALLEN et al., 1998). Para os métodos indiretos, a evapotranspiração é estimada por equações empíricas ou baseadas em princípios físico-fisiológicos, ou mesmo pela utilização de instrumentos para medição da evaporação da água (STONE; SILVEIRA, 1995).

Portanto, a importância do balanço de água no solo como ferramenta para avaliar a intensidade das saídas e entradas de água no solo e, por conseguinte, para definição dos períodos mais prováveis de déficit hídrico para a cultura e de potencial de poluição da água subterrânea está relacionada não só ao conhecimento dos fatores que compõem o balanço de água no solo (evapotranspiração, precipitação, drenagem interna ou ascensão capilar), como também ao conhecimento das características da planta, principalmente da sua fenologia, que representa o ponto de partida para a interpretação coerente dos resultados do balanço (CINTRA et al., 2000).

Impactos das práticas de cultivo com o uso de plantas de cobertura sobre os componentes do balanço de água no solo tem sido demonstrado em muitos locais ao redor do mundo (QI; HELMERS, 2010; KRUEGER et al., 2011; MURUNGU et al., 2011; ALCANTARA et al., 2011). Ward et al. (2012) investigaram o uso de plantas de cobertura (aveia, canola, ervilha e mostarda) cultivadas exclusivamente para aumentar a cobertura do solo em rotação de culturas, em um clima mediterrâneo, e compararam a evapotranspiração e a drenagem interna em dois tipos de solo no sudoeste da Austrália com o cultivo convencional.

Em revisão, Meyer et al. (2019) informam que as plantas de cobertura reduziram a drenagem interna do solo em 90% dos estudos analisados, equivalente a 32 a 27 mm em comparação com a do solo desnudo. No entanto, os autores encontraram ainda uma maior variabilidade nos dados de estudos baseados em medidas diretas do que nos que utilizaram a modelagem matemática. Isto se deve, principalmente, às fortes interações entre solo, clima, planta de cobertura utilizada e sistema de cultivo em relação à dinâmica dos processos envolvidos que, muitas vezes na modelagem, não são todos representados.

No entanto, plantas de cobertura não apenas influenciam o balanço da água no solo. Muñoz-Carpena et al. (2008) verificaram melhorias nas condições físicas do solo (aumento da retenção da água no solo) e aumento da evapotranspiração da cultura do milho e redução da drenagem do solo com o uso de crotalária como planta de cobertura de verão para posterior cultivo de milho na Flórida. No entanto, houve aumento da lixiviação de N, devendo-se assim, reduzir o uso de fertilizantes nitrogenados aplicados na safra de inverno. Salmerón et al. (2011), estudaram plantas de cobertura de inverno e métodos de plantio na produção de milho irrigado em clima mediterrâneo e concluíram que o uso de colza e ervilha foram eficientes para reduzir os riscos de lixiviação de N, mantendo a produtividade do milho, enquanto que a cobertura com cevada reduziu a produção de milho.

Em um experimento de campo com quatro plantas de cobertura (facélia, ervilha, centeio e mostarda) em comparação com o pousio, Bodner et al. (2007) concluíram que em ambientes áridos e semi-áridos plantas de cobertura, devido a sua demanda em água, podem reduzir a disponibilidade de água no solo para as culturas seguintes, causando, assim, possível decréscimo de rendimento (MITCHELL et al., 1999; SALAKO; TIAN, 2003; NIELSEN; VIGIL, 2005).

Utilizando um modelo hidrológico para o estudo de rendimento de soja e milho em solo com cobertura de trigo e sem cobertura, Yang et al. (2019) verificaram que a drenagem interna no solo com palhada de trigo foi 6% menor que no solo sem cobertura e a evapotranspiração real foi 5% maior no solo com cobertura. Os autores também observaram que a cobertura de trigo

aumentou a transpiração das culturas comerciais em 15% e reduziu a evaporação da superfície em 24%, melhorando assim o armazenamento de água no solo para promover a produção agrícola.

Outros autores mostraram que plantas de cobertura aumentaram tanto a capacidade de retenção de água quanto a permeabilidade do solo (COLLA et al., 2000), melhoraram a infiltração da água no solo (JOYCE et al., 2002), estruturaram o solo, aumentando a disponibilidade de água (CHEN et al., 2014; BASCHE et al., 2016a; YU et al., 2016) e reduziram a evaporação da água devido à cobertura do solo, resultando em maiores teores de água no solo na camada superficial (WAGNER-RIDDLE et al., 1997). Meyer et al. (2019) observaram ainda que a grande maioria dos estudos com plantas de cobertura descreveu uma redução na drenagem e mais de 50% dos estudos descreveram uma redução em uma faixa de 10 a 40 mm ao ano.

Outra tendência é a influência da precipitação e do tipo de solo na redução da drenagem da água. Em revisão Meyer et al. (2019) observaram que há maior redução na drenagem interna no solo em situações com mais de 800 mm de precipitação por ano do que em situações com menor precipitação em clima temperado. Também parece ter uma redução maior na drenagem de água em solos muito argilosos e argilosos do que em solos de textura média. Além de reduzir a drenagem interna da água no solo, as plantas de cobertura também diminuem eficientemente a lixiviação de nitrato, proporcionando um serviço ecossistêmico que reduz a poluição das águas subterrâneas (TONITTO et al., 2006).

No entanto, além da redução da drenagem que afeta a recarga das águas subterrâneas, as plantas de cobertura também podem reduzir o conteúdo de água no solo na semeadura, o que pode diminuir sua taxa de emergência e crescimento inicial (UNGERAND; VIGIL, 1998; MITCHELL et al., 2015; NIELSEN et al., 2015b). Outras pesquisas indicaram que as plantas de cobertura não melhoraram a disponibilidade de água no solo (BASCHE; DE LONGE, 2017; DAIGH et al., 2014) e ainda podem ser prejudiciais para a produção de culturas comerciais especialmente em anos muito secos (KRSTIĆ et al., 2018). E poucos estudos demonstraram que o efeito das plantas de cobertura na dinâmica da água do solo está principalmente relacionado à distribuição e quantidade de chuva durante os períodos de desenvolvimento das culturas (BLANCO-CANQUI et al., 2015; BASCHE et al., 2016b).

Visto que a mudança climática e a extrema variação na distribuição da precipitação durante o período de crescimento de culturas comerciais tem se tornado um grande desafio (KRSTIĆ et al., 2018), são necessários mais experimentos de campo com plantas de cobertura para medições diretas do balanço da água no solo que visem auxiliar a avaliação dos impactos

de vários fatores, como solo, clima e manejo das plantas de cobertura, e suas interações no balanço de água no solo (MEYER et al., 2019).

2.3 Propriedades Físico-hídricas do Solo e sua Influência na Armazenagem e na Evaporação da Água no Solo

Os solos cultivados em SPD, em geral, sofrem compactação na superfície, nos primeiros anos de implantação do sistema, devido ao tráfego de máquinas e implementos agrícolas, e uma consolidação natural com o tempo ocasionada pelo não revolvimento (ELTZ et al., 1989).

À medida que o solo é submetido a processos de compressão, há alterações na relação massa/volume dos constituintes do solo (TORMENA et al., 1998). Os poros de maior diâmetro (macroporos) colapsam-se mais facilmente promovendo aumento da microporosidade. O reflexo direto na alteração da relação entre macro e microporosidade é o aumento da capacidade de retenção de água pelo solo em SPD (STONE; SILVEIRA, 2001).

Os benefícios do SPD para a porosidade, segundo Voorhees e Lindstrom (1984), começam a aparecer a partir do quarto ano de implantação do sistema e atingem o equilíbrio após o sétimo ano, com acréscimo de 4 a 5 % no volume total de poros (CORSINI; FERRAUDO, 1999). Isto ocorre porque a cobertura do solo com material vegetal favorece a adição de matéria orgânica na superfície, elevando a capacidade de suporte de carga do solo (FIDALSKI, et al., 2015). Além disso, o aumento da matéria orgânica também contribui para uma melhor distribuição e continuidade dos poros, maior estabilidade de agregados e formação de bioporos pela fauna do solo e pelo apodrecimento das raízes (SHEPTUKHOV et al., 1994).

Portanto, com o tempo, o solo em SPD tende a apresentar maior armazenagem de água em relação a outros sistemas de manejo. Tal afirmação assume grande importância especialmente em cultivos sensíveis ao déficit hídrico e que possuem um período crítico bem definido, pois sua adoção pode resultar em maior disponibilidade de água às plantas cultivadas, diminuindo riscos de perdas de safras por estiagens (MODEL et al., 1995).

Além disso, as alterações na geometria porosa do solo em SPD influenciam diretamente a infiltração da água no solo neste sistema de manejo (FRANZLUEBBERS, 2002). Quando o solo está seco, a taxa de infiltração é elevada e com o tempo diminui, até se tornar constante quando o solo satura. Neste momento, a infiltração passa a ser função, quase que exclusivamente, da macroporosidade do solo e sua taxa é denominada de velocidade de infiltração básica, a qual pode ser definida como a quantidade máxima de água que o solo pode conduzir (HILLEL, 1973; REYNOLDS et al., 1995).

Quando a velocidade de infiltração básica da água é maior em um ou em outro sistema de manejo, indica que o solo apresenta também maior condutividade hidráulica na condição saturada (REICHARDT, 1990). Esta propriedade hídrica do solo é função do conteúdo de água no solo e sua variação está relacionada à variabilidade da porosidade e também da condição de saturação do solo (solo com maior ou menor conteúdo de água), sendo ambas modificadas pelas práticas de manejo do solo (AZOOZ; ARSHAD, 1996).

A manutenção dos resíduos na superfície do solo é uma das principais causas do aumento da infiltração de água em SPD, pois absorve o impacto da gota de chuva e reduz o selamento superficial, fator de alta restrição à entrada de água no solo, por obstruir os macroporos, responsáveis pelos fluxos de água no solo (BAUMHARDT et al., 1993; BARCELOS et al., 1999).

Outra causa do aumento da retenção e disponibilidade de água às plantas pelo solo em SPD é atribuída à formação de uma espécie de “colchão de ar” no material vegetal depositado sobre a superfície do solo que reduz a evaporação da água devido à redução de entrada de energia no sistema, por causa do aumento da refletividade e da rugosidade da superfície do solo (SHEN; TANNER, 1990; BAUMHARDT; JONES, 2002).

Segundo HILLEL (1973), o processo de evaporação da água do solo varia em função da energia que chega à superfície, bem como da diferença de pressão de vapor entre a superfície evaporante e o ar, as quais são determinadas por variáveis meteorológicas (radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade do ar).

Além disso, deve haver um suprimento contínuo de água do interior à superfície do solo, onde ocorre a evaporação. Esta condição depende do potencial mátrico da água e das condições de transferência do meio, como a função $K(\theta)$, isto é, a dependência funcional entre a condutividade hidráulica K do solo e o conteúdo de água no solo θ , para que, juntos, consigam manter uma taxa máxima de perda de água por evaporação (HILLEL, 1973). Portanto, o suprimento de água para a evaporação é dependente das propriedades físico-hídricas do solo as quais influenciam a dinâmica da água e são modificadas pelo SPD que não causa revolvimento do solo e mantém a palha na sua superfície (DALMAGO, 2004).

Desta forma, a variabilidade climática, associada às práticas de manejo do solo, pode ser importante fonte de variação do regime hídrico no solo em um ou outro sistema de manejo e, desta forma, afetar direta ou indiretamente o balanço de água no solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização e Caracterização da Área Experimental

O estudo foi realizado no Centro Experimental Central do Instituto Agronômico, mais especificamente na Fazenda Santa Elisa, situada em Campinas, SP, Brasil (22°54'S, 47°05'W e 669 m de altitude) (Figura 1).

Figura 1. Área de estudo, na Estação Experimental Central do Instituto Agronômico (Fazenda Santa Elisa), no município de Campinas, SP.

O clima da região é tropical de altitude, Cwa segundo Köppen, com temperatura média de 24 °C, com verões quentes e úmidos e pluviosidade média de 229,5 mm em janeiro e invernos de temperaturas amenas e pluviosidade média de 28,2 mm em julho; a pluviosidade média anual é de 1.398 mm (Alvares et al. 2013). Na figura 2 constam a precipitação e a temperatura média mensal de setembro de 2018 a setembro de 2019, período em que as atividades do presente estudo foram desenvolvidas.

Figura 2. Precipitação e temperatura média no período de condução do experimento (CIIAGRO, 2019).

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico férrico, argiloso a muito argiloso (Tabela 1), bem drenado e com declividade de aproximadamente 2% (SANTOS et al., 2018). A descrição morfológica do perfil de solo encontra-se no Apêndice A.

Tabela 1. Caracterização granulométrica das camadas do Latossolo Vermelho Distrófico férrico localizado no Centro Experimental Central do Instituto Agronômico (Fazenda Santa Elisa).

Camadas (m)	Frações granulométricas						$\rho_s^{(1)}$
	Areia		Silte	Argila	Textura		
	Grossa	Fina				Total	
	-----g kg ⁻¹ -----					kg m ³	
0,00-0,20	170	122	292	118	590	Argilosa	2880
0,20-0,40	137	114	251	104	645	Muito argilosa	2800
0,40-0,60	126	107	234	89	677	Muito argilosa	2820
0,60-0,80	122	110	232	91	677	Muito argilosa	2930
0,80-1,00	120	108	228	103	669	Muito argilosa	2960

⁽¹⁾ densidade dos sólidos.

3.2 Histórico da Área Experimental

Na área experimental de 2,20 ha foi instalado um experimento no ano agrícola de 2005/2006, quando foi implantado o plantio direto (PD). Para isso foi feita uma aração e duas gradagens. Foram estabelecidas plantas de cobertura na entressafra e parcelas em pousio e, posteriormente, cultivadas culturas sobre a palhada (Tabela 2).

Tabela 2. Histórico de plantio da área experimental.

Ano	Safra/Entressafra (gramínea)	Entressafra (leguminosa)	Pousio
2005	Aveia	Chicharo	Pousio
2005/2006	Soja		
2006	Milheto	Mucuna	Pousio
2006/2007	Soja		
2007	Triticale	Chicharo	Pousio
2007/2008	Soja		
2008	Aveia	-	Pousio
2008/2009	Milho		
2009	Triticale	Crotalária	Pousio
2009/2010	Soja		
2010	Triticale	Crotalária	Pousio
2010/2011	Soja		
2011	Triticale	Crotalária	Pousio
2011/2012	Soja		
2012	Aveia	Crotalária	Pousio
2012/2013	Soja		
2013	Milheto	-	-
2013/2014	Soja*		
2014	Triticale*	-	-
2014/2015	Milho		
2015	Triticale	-	-
2015/2016	Milho		
2016	Braquiária ruziziensis	-	-
2016/2017	Sorgo forrageiro		
2017	Milheto	-	-
2017/2018	Milheto		
2018	Milheto	Crotalária*	Pousio

*Safras perdidas por evento de seca.

Na safra 2016/2017, quando o sorgo forrageiro estava sendo cultivado e dar-se-ia início ao experimento para fins do presente estudo, ocorreu um incêndio em setembro/2017 na área experimental. Como medida emergencial foi realizado a semeadura do milheto (*Pennisetum glaucum*) por ser uma gramínea de rápido crescimento, com o objetivo de uniformizar a área e produzir palhada para cobertura do solo. Após o manejo químico e mecânico da cultura, em março/2018 foi realizado a semeadura das plantas de cobertura (gramínea e leguminosa) para início do desenvolvimento do presente estudo. No entanto, devido à escassez de chuvas, não

ocorreu a germinação da espécie de leguminosa e a safra foi perdida. Após o reestabelecimento das chuvas (setembro/2018), a semeadura das plantas de cobertura foi realizada com sucesso.

Por meio da análise de fertilidade do solo (Tabela 3), foi verificada necessidade de calagem. A calagem foi realizada com o objetivo de elevar a saturação por bases a 80%. Portanto, em 16/08/2018 foi aplicado 3,00 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT = 75%) em área total, com o distribuidor de calcário Piccin 5500 tracionado por um trator Massey Ferguson 7390 (Figura 3).

Tabela 3. Média dos atributos químicos nas camadas de solo dos tratamentos sob plantio direto, em junho de 2018.

Camada (m)	M.O g dm ⁻³	pH CaCl ₂	P mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	H+Al	S.B	CTC	V%
-----mmol _c dm ⁻³ -----										
Gramínea										
0,00-0,20	28,0	4,8	50,0	5,7	21,0	9,0	37,0	35,7	72,7	49,0
0,20-0,40	15,0	4,6	6,0	1,3	13,0	4,0	34,0	18,3	52,3	35,0
0,40-0,60	9,0	5,1	2,0	0,6	11,0	4,0	24,0	15,6	39,6	39,0
0,60-0,80	8,0	5,2	2,0	0,7	9,0	3,0	22,0	12,7	34,7	37,0
0,80-1,00	7,0	5,5	2,0	0,5	10,0	4,0	18,0	14,5	32,5	45,0
Leguminosa										
0,00-0,20	25,0	5,1	30,0	4,9	22,0	8,0	33,0	34,9	67,9	51,0
0,20-0,40	15,0	4,9	5,0	0,9	14,0	6,0	29,0	20,9	49,9	42,0
0,40-0,60	10,0	5,0	3,0	0,6	12,0	5,0	24,0	17,6	41,6	42,0
0,60-0,80	8,0	5,3	2,0	0,9	11,0	5,0	19,0	16,9	35,9	47,0
0,80-1,00	7,0	5,6	5,0	0,6	12,0	4,0	17,0	16,9	33,6	49,0
Pousio										
0,00-0,20	26,0	4,8	24,0	3,7	17,0	7,0	38,0	27,7	65,7	42,0
0,20-0,40	18,0	4,6	6,0	1,1	14,0	6,0	34,0	21,1	55,1	38,0
0,40-0,60	12,0	5,1	4,0	1,0	13,0	5,0	24,0	19,0	43,0	44,0
0,60-0,80	8,0	5,3	2,0	0,7	11,0	4,0	20,0	15,7	35,7	44,0
0,80-1,00	8,0	5,6	2,0	0,5	13,0	4,0	18,0	17,5	35,5	49,0

Figura 3. Aplicação de calcário em área total.

Em 22/08/2018 o PD foi interrompido por meio do preparo do solo, para obtenção do tratamento Preparo Convencional (PC), sendo então o calcário incorporado neste tratamento. O preparo do solo foi realizado por meio de grade aradora com 16 discos de 24 polegadas da

Somassey e grade niveladora para quebra dos torrões, ambas tracionadas por um trator Massey Ferguson 4275. A profundidade efetiva de operação foi de 0,20 m (Figura 4).

Figura 4. Preparo do solo com grade aradora no tratamento Preparo Convencional (PC).

3.3 Delineamento Experimental e Caracterização dos Tratamentos

As parcelas experimentais possuem 800 m² (80,0 x 10,0 m) e 200,0 m² (20,0 x 10,0 m) cuja distribuição na área experimental está apresentada na figura 5.

Figura 5. Croqui da área experimental.

O delineamento experimental em blocos casualizados (DBC) foi composto por três blocos (repetição) com parcelas subdivididas, sendo o fator da parcela o manejo do solo (Plantio

Direto – PD e Preparo Convencional – PC) e o fator da subparcela três tipos de cobertura do solo: a gramínea sorgo-forrageiro (*Sorghum bicolor* L.), a leguminosa feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* L.) e sem cobertura (parcelas que permaneceram sob pousio), contabilizando 18 unidades experimentais.

Portanto, os tratamentos são descritos como: PC-Gramínea; PC-Leguminosa; PC-Pousio; PD-Gramínea; PD-Leguminosa e PD-Pousio. Nos tratamentos sob Preparo Convencional do solo (PC) a palha existente de cultivos anteriores foi incorporada com a grade aradora nos respectivos tratamentos (PC-Gramínea e PC-Leguminosa). Em PC-Pousio não há palha incorporada (Figura 6).

Figura 6. Tratamentos em Preparo Convencional do solo (PC). (A): Com palha incorporada (gramínea e leguminosa). (B): Sem palha incorporada (pousio).

3.4 Plantas de Cobertura e Pousio

Foi realizada a dessecação somente das parcelas sob PD em 12/09/2018, devido à germinação das sementes de milho da safra 2017/2018, utilizando 2 L ha⁻¹ do ingrediente ativo glifosato com o pulverizador autopropelido Massey Ferguson MF 9030.

Para compor as parcelas de plantas de cobertura da entressafra do ano de 2018, optou-se por semear o sorgo-forrageiro (*Sorghum bicolor* L.) como espécie de gramínea, para rotacionar a cultura, já que na safra de 2017/2018 cultivou-se o milho (*Pennisetum glaucum* L.).

Em 13/09/2018 foi realizado a semeadura de sorgo-forrageiro nos tratamentos PC-Gramínea e PD-Gramínea. Foram colocadas 25 sementes por metro linear em espaçamento de 0,45 m, utilizando a semeadora SDA2 Super Tatu de 7 linhas tracionada por um trator Massey Ferguson 291 (Figura 7). A profundidade de corte do disco da semeadora foi regulada diferentemente para cada tipo de preparo do solo.

Figura 7. Detalhes do plantio do sorgo-forrageiro como planta de cobertura gramínea.

Devido à perda da entressafra de 2018 da espécie de leguminosa (*Crotalaria spectabilis*), optou-se pelo plantio do feijão-de-porco, por ser uma espécie rústica a ser cultivada na primavera-verão e por apresentar crescimento inicial e fechamento rápidos.

A semeadura do feijão-de-porco nos tratamentos PC-Leguminosa e PD-Leguminosa foi realizado em 19/09/2018. Os sulcos de plantio foram abertos à profundidade de 0,08 m por sulcador de 5 hastes com espaçamento de 0,50 m tracionado por um trator Massey Ferguson 275. Devido ao tamanho da semente de feijão-de-porco, não havia máquina semeadora. Por este motivo, a semeadura foi realizada manualmente sendo distribuídas 6 sementes por metro linear (Figura 8). Os sulcos foram fechados manualmente com auxílio de enxada.

Figura 8. Detalhes do plantio do feijão-de-porco como planta de cobertura leguminosa.

O sorgo permaneceu no campo 65 DAE (dias após a emergência) e o feijão-de-porco 63 DAE, quando atingiram produção suficiente de massa seca para cobertura do solo (Figura 9). Em 27/11/2018 as plantas de cobertura foram dessecadas utilizando 1,50 L ha⁻¹ e 0,50 L ha⁻¹ dos ingredientes ativos glifosato e paraquate, respectivamente, com o pulverizador

autopropelido Massey Ferguson MF 9030 e, em 30/11/2018 a área experimental foi roçada com roçadora de transmissão direta, acoplada ao trator Massey Ferguson 275.

Figura 9. Estado de desenvolvimento das plantas de cobertura, momento no qual foi realizado o manejo químico e mecânico. **(A):** Sorgo-forrageiro. **(B):** Feijão-de-porco.

As plantas de cobertura cresceram em competição com as plantas daninhas, e não foi efetuado nenhum tipo de manejo para o controle das mesmas, inclusive nos tratamentos sob pousio. A figura 10 mostra a infestação de plantas daninhas sob o PC-Pousio e PD-Pousio.

Figura 10. Infestação de plantas daninhas nos tratamentos sob pousio. **(A):** PC-Pousio. **(B):** PD-Pousio.

Foi realizado em 22/11/2018 o levantamento do número e espécies de plantas daninhas utilizando um arco metálico de 0,25 m², o qual era lançado por três vezes, ao acaso, em cada parcela. As plantas daninhas identificadas na área experimental foram: caruru-rasteiro (*Amaranthus deflexus*), beldroega (*Portulaca oleracea*), nabiça (*Raphanus raphanistrum*), carrapicho-de-carneiro (*Acanthospermum hispidum*), capim-carrapicho (*Cenchrus echinatus*), ançarinha-branca (*Chenopodium album*), buva (*Conyza banariensis*), caruru-de-mancha (*Amaranthus viridis*), capim-amargoso (*Elionurus candidus*), capim-pé-de-galinha (*Aeleusine indica*), fedegoso (*Senna obtusifolia*), mussambê (*Cleome affinis*), campainha (*Ipomoea*

acuminata), caruru-roxo (*Amaranthus hybridus*), botão-de-ouro (*Galingosa ciliata*) e corda-de-viola (*Ipoema purpurea*). Na tabela 4 estão

apresentados os valores de densidade superficial de plantas daninhas por tratamento.

Tabela 4. Densidade superficial de plantas daninhas (número de indivíduos por m²).

Tratamento	Espécie (nome popular)	Densidade superficial
PC-Gramínea	ançarinha-branca	5,60
	beldroega	0,80
	caruru-rasteiro	20,0
	campainha	0,80
	nabiça	0,80
	mussambê	0,40
PC-Leguminosa	ançarinha-branca	0,40
	beldroega	0,80
	capim-carrapicho	0,80
	carrapicho-de-carneiro	0,40
	caruru-rasteiro	6,00
	caruru-roxo	1,60
PC-Pousio	ançarinha-branca	4,40
	beldroega	3,20
	capim-carrapicho	0,80
	campainha	0,40
	caruru-rasteiro	19,2
	caruru-roxo	0,40
PD-Gramínea	botão-de-ouro	0,40
	buva	3,60
	capim-amargoso	1,60
	caruru-rasteiro	11,2
	caruru-de-mancha	0,40
PD-Leguminosa	corda-de-viola	0,40
	fedegoso	0,40
	mussambê	0,80
	buva	0,80
	caruru-rasteiro	6,80
PD-Pousio	ançarinha-branca	1,60
	buva	0,40
	beldroega	5,60
	capim-carrapicho	2,80
	capim-pé-de-galinha	1,20
	caruru-rasteiro	13,6
	beldroega	0,40

3.5 Cultura do Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade IAC Sintonia

3.5.1 Semeadura

A semeadura desta variedade de feijão, que foi efetuada para a safra de verão, possui tolerância aos patógenos da Antracnose e ao *Fusarium oxysporum*. Possui porte ereto e é recomendada para o cultivo na época das águas, da seca e de inverno no Estado de São Paulo. Seu ciclo médio é de 88 dias, alcançando o florescimento aos 30 DAE.

Antes da semeadura do feijão, em 04/12/2019 foi realizado novamente o preparo convencional do solo, como descrito no item 3.2. Os implementos foram tracionados por um trator Massey Ferguson 4275 e a profundidade efetiva de operação foi de 0,19 m. Em 18/12/2018 foi realizado o controle de plantas daninhas com aplicação de 6,0 L ha⁻¹ e 3,0 L ha⁻¹ dos ingredientes ativos glifosato e paraquate, respectivamente, com o pulverizador autopropelido Massey Ferguson MF 9030.

A semeadura/adubação do feijão foi realizada em 28/12/2018 utilizando a semeadora/adubadora SDA2 Super Tatu de 7 linhas, tracionada pelo trator Massey Ferguson 291. A máquina foi regulada para semear 12 sementes por metro linear em espaçamento de 0,45 m e aplicar 50 kg ha⁻¹ de boro granulado e 300 kg ha⁻¹ do fertilizante formulado NPK 4-30-16. Esta adubação seguiu as recomendações do Boletim 200 (AGUIAR et al., 2014).

3.5.2 Tratos culturais

Durante o ciclo da cultura do feijão, foram realizados tratos culturais que compreendem o controle de insetos, ácaros, fungos e plantas daninhas, os quais foram realizados por meio de aplicações com o pulverizador autopropelido Massey Ferguson MF 9030. A adubação de cobertura seguiu as recomendações de Aguiar et al. (2014) e foi realizada com distribuidor de adubo hidráulico acoplado ao trator Massey Ferguson 275. A colheita foi realizada em 26/03/2019 com colhedora híbrida Massey Ferguson 6690. Os tratos culturais da cultura do feijão estão discriminados na tabela 5.

Tabela 5. Tratos culturais realizados durante o ciclo da cultura do feijão, variedade Sintonia-IAC.

Data	Trato cultural	Ingrediente ativo	Dose
08/01/2019	inseticida	acefato	0,5 Kg ha ⁻¹
08/01/2019	acaricida	abamectina	0,05 L ha ⁻¹
11/01/2019	herbicida	fomesafam	0,8 L ha ⁻¹
15/01/2019	inseticida	acefato	0,5 Kg ha ⁻¹
24/01/2019	herbicida	bentazona	2,0 L ha ⁻¹
24/01/2019	herbicida	cletodim	1,0 L ha ⁻¹
25/01/2019	adubação de cobertura	uréia	300 Kg ha ⁻¹
31/01/2019	inseticida	lambda-cialotrina e tiametoxam	0,5 L ha ⁻¹
31/01/2019	adubação foliar	macronutrientes	2,0 Kg ha ⁻¹
05/02/2019	inseticida	acetaprimido	0,5 Kg ha ⁻¹
05/02/2019	fungicida	clorotalonil	2,0 L ha ⁻¹
08/02/2019	inseticida	deltametrina	0,3 L ha ⁻¹
08/02/2019	fungicida	metconazol	1,0 L ha ⁻¹
14/02/2019	inseticida	beta-ciflutrina e imidacloprido	1,0 L ha ⁻¹
14/02/2019	adubação foliar	micronutrientes	2,0 L ha ⁻¹
20/02/2019	capina manual - plantas daninhas	-----	-----
20/02/2019	herbicida	fluazifope-bulfitilico	0,15 L ha ⁻¹
06/03/2019	inseticida	alfa-cipermetrina	0,25 L ha ⁻¹
06/03/2019	inseticida	clorpirifós	0,8 L ha ⁻¹
07/03/2019	capina manual - plantas daninhas	-----	-----
18/03/2019	inseticida	alfa-cipermetrina	0,25 L ha ⁻¹
18/03/2019	inseticida	clorpirifós	0,8 L ha ⁻¹

3.6 Cultura do Triticale (*Triticosecale rimpaui* L.), Variedade IAC 5 Canindé

3.6.1 Semeadura

Esta variedade do triticale, cuja semeadura foi efetuada para a safra de inverno, apresenta bom potencial de rendimento de grãos nas condições de cultivo de sequeiro, possuindo as seguintes características agronômicas: porte baixo (120 a 135 cm), ciclo médio (135 a 145 dias de germinação à colheita), moderadamente resistente ao acamamento, resistência ao crestamento, resistente à ferrugem da folha e ao oídio e moderada resistência às manchas foliares (causadas por helmintosporiose e pela alta suscetibilidade à brusone), resistente à debulha natural e moderadamente sensível à germinação na espiga.

Antes da semeadura do triticale, em 11/04/2019, foi realizado novamente o preparo convencional do solo, como descrito no item 3.2. Os implementos foram tracionados por um trator Massey Ferguson 4275 e a profundidade efetiva de operação foi de 0,17 m. No mesmo dia foi realizado o controle de plantas daninhas com aplicação de 2,0 L ha⁻¹, 0,5 L ha⁻¹, 0,5 L ha⁻¹ e 0,7 kg ha⁻¹ dos ingredientes ativos glifosato, haloxifope-p-metilico, óleo mineral e saflufenacial, respectivamente, com o pulverizador hidráulico KO 2000 IH18 tracionado pelo trator Massey Ferguson 4275.

A semeadura/adubação do triticale foi realizada em 12/04/2018 utilizando a semeadora/adubadora Massey Ferguson MF 621 de 21 linhas, tracionada pelo trator Massey Ferguson 7390. A máquina foi regulada para plantar 50 sementes por metro linear em

espaçamento de 0,17 m, e aplicar 150 kg ha^{-1} do fertilizante formulado NPK 4-30-16. Esta adubação seguiu as recomendações do Boletim 200 (AGUIAR et al., 2014).

3.6.2 Tratos culturais

Durante o ciclo da cultura do triticale, foram realizados tratos culturais, que compreendem o controle de pragas e plantas daninhas, os quais foram realizados por meio de aplicações com o pulverizador autopropelido Massey Ferguson MF 9030. A adubação de cobertura seguiu as recomendações de Aguiar et al. (2014) e foi realizada com distribuidor de adubo hidráulico acoplado ao trator Massey Ferguson 275. A colheita do triticale foi realizada em 09/09/2019 com colhedora axial Massey Ferguson 9660. Os tratos culturais da cultura do triticale consistiram: a) da aplicação de herbicida (metsulfurom-metílico) na dose de $0,5 \text{ kg ha}^{-1}$, no dia 09/05/2019 e b) da adubação de cobertura com sulfato de amônio (150 kg ha^{-1}), no dia 31/05/2019.

3.7 Amostragem de solo

As amostragens de solo foram realizadas no período de 2018 a 2019. Os atributos foram investigados nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m e 0,00-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m de profundidade. As amostras deformadas de solo foram coletadas com auxílio de trado holandês e as amostras indeformadas de solo foram coletadas em anéis metálicos de aproximadamente 0,05 m de altura, 0,05 m de diâmetro e volume interno de 100 cm^3 , utilizando o amostrador de Uhland. As amostras foram levadas para o Laboratório de Física do Solo e Fertilidade do Solo do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) para análise química do solo (amostras deformadas) e análise físico-hídrica (amostras indeformadas).

A amostragem do solo com estrutura indeformada foi efetuada em quatro momentos: a primeira em setembro/2018 nas camadas de 0,00-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m de profundidade para determinação das curvas de retenção da água no solo e caracterização física dos tratamentos; as três outras, nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m de profundidade, em novembro/2018 (final do ciclo das plantas de cobertura), em março/2018 (final do ciclo do feijão) e em agosto/2019 (final do ciclo do triticale), para determinação da densidade do solo, porosidade, macroporosidade, microporosidade e resistência do solo à penetração.

3.8 Avaliações no Solo

3.8.1 Análise química

Para a caracterização química do solo do experimento e verificação da necessidade de calagem e adubação foram coletadas três amostras deformadas simples em cada parcela nas camadas de 0,00-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m de profundidade, compondo uma amostra composta de cada tratamento em 03/05/2018 (antes da calagem – Tabela 3). Em 11/06/2016 foi realizada novamente a amostragem de solo para verificação dos níveis de nutrientes no solo após a calagem e adubação das culturas (Tabela 6).

As análises químicas para fins de fertilidade foram realizadas por métodos descritos por Raij e Quaggio (1983). Foram determinados o pH, matéria orgânica (MO), P, Ca, Mg, K e H+Al e calculadas a capacidade de troca de cátions do solo (CTC), saturação por bases (V) e soma de bases (SB) do solo.

Tabela 6. Média dos atributos químicos do solo após calagem e adubação das culturas dos tratamentos sob plantio direto e preparo convencional do solo em julho de 2019.

(continua)

Camada (m)	M.O g dm ⁻³	pH CaCl ₂	P mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	H+Al	S.B	CTC	V%
PC-Gramínea										
0,00-0,20	31,0	4,3	25,0	2,9	20,0	8,0	43,0	30,9	73,9	42,0
0,20-0,40	29,0	5,3	13,0	1,1	10,0	3,0	30,0	14,1	44,1	32,0
0,40-0,60	23,0	4,8	1,0	0,6	16,0	6,0	24,0	22,6	46,6	48,0
0,60-0,80	25,0	5,3	1,0	0,8	15,0	6,0	23,0	21,8	44,8	49,0
0,80-1,00	27,0	5,1	1,0	0,6	15,0	5,0	18,0	20,6	38,6	53,0
PC-Leguminosa										
0,00-0,20	23,0	5,1	30,0	2,7	34,0	14,0	30,0	50,7	80,7	63,0
0,20-0,40	24,0	4,6	3,0	1,3	18,0	7,0	26,0	26,3	52,3	50,0
0,40-0,60	26,0	5,2	1,0	1,1	17,0	6,0	23,0	24,1	47,1	51,0
0,60-0,80	29,0	5,0	1,0	1,0	17,0	6,0	19,0	24,0	43,0	56,0
0,80-1,00	21,0	5,3	1,0	0,9	16,0	5,0	18,0	21,9	39,9	55,0

Tabela 6. Média dos atributos químicos do solo após calagem e adubação das culturas dos tratamentos sob plantio direto e preparo convencional do solo em julho de 2019.

(conclusão)

Camada (m)	M.O g dm ⁻³	pH CaCl ₂	P mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	H+Al -----mmol _c dm ⁻³ -----	S.B	CTC	V%
PC-Pousio										
0,00-0,20	21,0	4,8	38,0	5,0	38,0	14,0	30,0	57,0	87,0	66,0
0,20-0,40	22,0	4,9	2,0	2,4	25,0	8,0	34,0	35,4	69,4	51,0
0,40-0,60	20,0	4,9	1,0	1,0	18,0	7,0	27,0	26,0	53,0	49,0
0,60-0,80	27,0	5,1	1,0	0,8	17,0	6,0	24,0	23,8	47,8	50,0
0,80-1,00	22,0	5,1	1,0	1,1	14,0	5,0	17,0	20,1	37,1	54,0
PD-Gramínea										
0,00-0,20	23,0	4,9	57,0	4,1	48,0	16,0	29,0	68,1	97,1	70,0
0,20-0,40	26,0	4,8	1,0	1,6	14,0	5,0	28,0	20,6	48,6	42,0
0,40-0,60	23,0	4,7	1,0	1,1	22,0	6,0	31,0	29,1	60,1	48,0
0,60-0,80	21,0	5,0	1,0	1,0	16,0	5,0	24,0	22,0	46,0	48,0
0,80-1,00	25,0	5,0	1,0	1,0	17,0	6,0	21,0	24,0	45,0	53,0
PD-Leguminosa										
0,00-0,20	22,0	5,2	36,0	4,0	25,0	8,0	19,0	37,0	56,0	66,0
0,20-0,40	24,0	4,6	1,0	1,6	21,0	7,0	50,0	29,6	79,6	37,0
0,40-0,60	21,0	5,2	1,0	0,8	31,0	7,0	21,0	38,8	59,8	65,0
0,60-0,80	26,0	5,0	6,0	0,5	15,0	7,0	21,0	22,5	43,5	52,0
0,80-1,00	22,0	5,2	1,0	0,5	16,0	7,0	42,0	23,5	65,5	36,0
PD-Pousio										
0,00-0,20	24,0	4,6	46,0	4,9	38,0	15,0	37,0	57,9	94,9	61,0
0,20-0,40	23,0	4,7	1,0	1,7	17,0	7,0	42,0	25,7	67,7	38,0
0,40-0,60	21,0	5,1	1,0	1,7	23,0	11,0	22,0	35,7	57,7	62,0
0,60-0,80	19,0	5,1	1,0	0,9	19,0	11,0	42,0	30,9	72,9	42,0
0,80-1,00	23,0	5,2	1,0	0,5	16,0	6,0	19,0	22,5	41,5	54,0

3.8.2 Análise granulométrica

A determinação da distribuição das partículas primárias do solo foi realizada pelo método da pipeta, empregando-se solução de hidróxido de sódio e hexametáfosfato de sódio como dispersante químico e agitação lenta a 30 rpm durante 16 horas, considerando-se a proporção de argila, silte e das areias grossa e fina em amostras deformadas de solo (CAMARGO et al., 2009).

3.8.3 Densidade dos sólidos, densidade do solo e porosidade

A densidade dos sólidos (ρ_s), quociente da massa de sólidos (m_s) e o volume de sólidos (V_s) foi determinada pelo método do picnômetro (FLINT; FLINT, 2002), realizada em amostras de solo passadas em peneira de malha 2,00 mm e secas em estufa a 105°C:

$$\rho = \frac{m_s}{V_s} (kg\ m^{-3}) \quad [1]$$

A densidade do solo (ρ) foi determinada a partir de amostras indeformadas de solo e calculada pelo quociente da massa de sólidos (m_s) e o volume (V) do respectivo anel volumétrico:

$$\rho = \frac{m_s}{V} (kg\ m^{-3}) \quad [2]$$

A porosidade (α) foi calculada a partir dos valores determinados de ρ e ρ_s :

$$\alpha = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) (m^3\ m^{-3}) \quad [3]$$

A microporosidade foi calculada a partir da diferença entre o conteúdo de água volumétrico na amostra de solo saturada e o conteúdo de água na amostra equilibrada em 6 kPa em mesa de tensão correspondente à água retida nos microporos (KIEHL, 1979). A macroporosidade foi calculada pela diferença entre a porosidade e microporosidade, sendo os valores expressos em $m^3\ m^{-3}$.

3.8.4 Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração foi determinada no campo, quando o conteúdo de água do solo estava próximo à capacidade de campo ($0,29\ g\ g^{-1}$), antes do preparo do solo (14/08/2018) e após o preparo do solo (23/08/2018) para conhecimento do estado de compactação do solo proveniente dos 13 anos de plantio direto. Para determinar a resistência do solo à penetração foi utilizado um penetrômetro de impacto (modelo IAA/PLANALSUCAR) (Figura 11A).

Foram realizados três ensaios de resistência do solo à penetração em cada parcela experimental, contabilizando nove repetições para cada tratamento. Seguindo as recomendações de STOLF (1991) para cálculo da resistência, foram contados o número de impactos necessários para que a haste do equipamento penetrasse 0,05 m no solo. A avaliação foi feita até a profundidade de 0,60 m, limite do equipamento. Concomitantemente à resistência

do solo à penetração, foram coletadas amostras deformadas de solo a cada 0,10 m para determinação do conteúdo de água.

Nas amostras de solo coletadas nos anéis metálicos ao final do ciclo das culturas (plantas de cobertura, feijão e triticales), após serem equilibrados em mesa de tensão a 6 kPa, para fins de determinação dos atributos físicos do solo, foram realizados ensaios de resistência do solo à penetração utilizando o penetrômetro de bancada CT3TM Texture Analyzer da Brookfield Ametek (Figura 11B), no Laboratório de Física do Solo da Escola Superior de Agricultura – Luiz de Queiroz (ESALQ/USP).

Figura 11. (A): Penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSUCAR. **(B):** Penetrômetro de bancada CT3TM Texture Analyzer.

Com apoio de planilha Excel foram realizados os cálculos de acordo com as equações 4 e 5, sendo os valores obtidos em kgf cm^{-2} multiplicados por 0,098 para transformação em unidades MPa:

$$F = (M + m) \cdot g + \left(\frac{M}{M + n} \right) \cdot \left(\frac{Mgh}{x} \right) \quad [4]$$

$$R = \frac{F}{A} \quad [5]$$

em que, M é a massa que provoca o impacto (kg); m é a massa dos demais componentes (kg); g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ ms}^{-2}$); h é altura de queda (cm); x é a penetração por impacto

(cm); R é a resistência (kgf cm^{-2}); F é a força da resistência (kgf) e A é a área da base do cone (cm^2).

Os valores de resistência do solo à penetração obtidos nos anéis metálicos foram corrigidos de acordo com o conteúdo de água no solo e a densidade do solo, utilizando a função não linear (Equação 6) desenvolvida por Busscher (1990):

$$R = b_0 \theta^{b_1} \rho^{b_2} \quad [6]$$

em que, R é a resistência do solo à penetração (MPa); θ é o conteúdo de água à base de volume do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); ρ é a densidade do solo (kg m^{-3}) e b_0 , b_1 e b_2 são parâmetros de ajuste da equação.

3.8.5 Curva de retenção

Para as curvas de retenção da água no solo foram utilizadas as amostras indeformadas. Cada amostra foi submetida às tensões de 1, 3, 6, 8 e 10 kPa na mesa de tensão e posteriormente encaminhadas às câmaras de pressão com placas porosas de 1 bar (tensões de 30, 50 e 100 kPa), 3 bar (300 kPa) e 5 bar (500 kPa), seguindo os procedimentos descritos em Libardi (2012). Assim que os conteúdos de água nas amostras equilibravam-se na referida tensão, as amostras eram pesadas em balança de precisão. Após a última tensão aplicada na câmara de baixa pressão, as amostras eram levadas à estufa a 105°C durante 48 horas para secagem, seguida, novamente, de pesagem para obtenção da massa de sólidos. O ponto de murcha permanente (PMP) correspondente à tensão de 1500 kPa, foi obtido por meio de amostra deformada de solo em câmara de pressão com placa porosa de 15 bar.

Após a determinação do conteúdo de água à base de volume θ obtido para cada tensão τ as curvas de retenção da água no solo foram ajustadas à equação (7), utilizando o software Table Curve 2D – Jandel Scientific – Copyright 1989-1994:

$$\theta = \theta_r + \left(\frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha |\phi_m|)^n]^m} \right) (\text{m}^3 \text{ m}^{-3}) \quad [7]$$

em que, θ é o conteúdo volumétrico da água no solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_s e θ_r tal conteúdo na saturação e residual ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), respectivamente; ϕ_m é o potencial mátrico da água no solo (kPa); α , n e m são parâmetros empíricos do ajuste, sendo que α representa o inverso do potencial de entrada

de ar na amostra e n e m ligados à distribuição de poros. As curvas de retenção da água no solo e os parâmetros de ajuste encontram-se no Apêndice B.

A equação (7) foi utilizada por van Genuchten (1980) que a combinou com o modelo de Mualem (1976) para previsão da condutividade hidráulica do solo K em função do conteúdo de água θ .

3.8.6 Condutividade hidráulica do solo

Procedimento experimental do método do perfil instantâneo

Para determinação da condutividade hidráulica (K) do solo em função do conteúdo de água no solo (θ), pelo método do perfil instantâneo (WATSON, 1966; LIBARDI, 2012), foi delimitada uma parcela circular de 3,00 m de diâmetro e 0,60 m de profundidade, adjacente à área experimental (Figura 12A).

Na trincheira de formato circular com aproximadamente 0,50 m de largura e 0,60 m de profundidade, foi introduzida uma estrutura de chapa galvanizada de 0,70 m de altura até a profundidade de 0,60 m, a fim de evitar o fluxo lateral de água durante os processos de inundação e de redistribuição da água (Figura 12B). Foi deixado 0,10 m de tal estrutura acima da superfície do solo para que se pudesse ter uma lâmina de água durante a infiltração.

Figura 12. (A): Coluna de solo delimitada no campo e trincheira circular para introdução da chapa galvanizada. (B): Chapa galvanizada introduzida no solo.

No centro da parcela foram instalados 10 tensiômetros com manômetro de mercúrio nas profundidades de 0,10, 0,20, 0,30, 0,40, 0,50, 0,60, 0,70, 0,80, 0,90 e 1,00 m (Figura 13).

Figura 13. Tensiômetros instalados no centro da circunferência.

O perfil foi saturado (Figura 14A) e, posteriormente, a parcela foi coberta com uma lona plástica, para evitar a evaporação e a entrada de água através da superfície (Figura 14B). O momento da colocação do plástico foi considerado como tempo zero ($t = 0$) de redistribuição, quando foram iniciadas as leituras dos tensiômetros até que o movimento da água praticamente cessasse, ou seja, até que as leituras dos tensiômetros se tornaram praticamente constantes, período de 20 dias.

Figura 14. (A): Saturação do perfil. (B): Colocação da lona plástica para evitar a evaporação e a entrada de água através da superfície.

A partir das leituras dos tensiômetros, foram obtidos os valores de potencial mátrico da água no solo (ϕ_m) e, por meio das curvas de retenção, em cada tratamento (item 3.8.5), os valores de conteúdo de água volumétrico no solo (θ) ao longo do perfil durante o tempo de redistribuição (Apêndice C). Com as medidas de θ e ϕ_m , determinou-se a condutividade hidráulica do solo K em função do conteúdo de água θ na profundidade de 0,70 m (para as plantas de cobertura) e 0,80 m (para as culturas do feijão e do triticale), limite do volume de solo delimitado para o balanço de água, por meio do procedimento proposto por Hillel et al. (1972) e descrito por Libardi (2012).

Base matemática do método do perfil instantâneo

O procedimento experimental que acabou de ser descrito ajusta-se ao seguinte problema de contorno (equação diferencial (8) e condições inicial e de contorno (9)):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial \phi_t}{\partial z} \right) \quad [8]$$

$$\left. \begin{array}{lll} t = 0, & z > 0, & \theta_0 = \theta_0(z) \\ t > 0, & z \rightarrow \infty, & \theta = \theta_i \\ t > 0, & z = 0, & q = 0 \end{array} \right\} \quad [9]$$

A equação (8) é a equação diferencial de Richards para o fluxo da água na direção vertical, θ é o conteúdo de água no solo, função da coordenada vertical de posição z e do tempo de redistribuição da água t ; θ_0 é o conteúdo de água em $t = 0$; θ_i é o conteúdo de água inicial no solo antes do umedecimento; ϕ_t é o potencial total da água e q é a densidade de fluxo da água no solo na profundidade $z = L$. Está-se considerando aqui que a posição do eixo da coordenada z é positivo para baixo e tem sua origem coincidente com a superfície do solo.

Integrando a equação (8) com relação a z , entre $z = 0$ (onde $q = 0$ uma vez que a lona plástica não permite entrada e nem saída de água pela superfície) e $z = L$, obtém-se a equação (10).

$$K(\theta) = \frac{\int_0^L \frac{\partial \theta}{\partial t} dz}{\frac{\partial \phi_t}{\partial z}} \quad [10]$$

em que, a integral representa a densidade de fluxo da água na profundidade L e $\partial \phi_t / \partial z$ é o gradiente de potencial total em L .

A condutividade hidráulica K varia exponencialmente com o conteúdo de água θ e a equação que mostra esta dependência pode ser escrita na forma da equação (11) (LIBARDI et al., 1980):

$$K(\theta) = K_0 e^{\gamma(\theta - \theta_0)} \quad [11]$$

em que, γ é o coeficiente angular da reta determinada pela regressão linear de $\ln K$ em função de θ , e K_0 e θ_0 são a condutividade hidráulica e o conteúdo de água no solo à base de volume em $t = 0$.

Assim, após aplicação do método foram obtidas as funções $K(\theta)$ para as profundidades de 0,70 e 0,80 m para cada um dos tratamentos experimentais (Apêndice D).

3.9 Balanço de Água no Solo

O balanço de água foi realizado compreendendo três períodos: o ciclo das plantas de cobertura, o ciclo da cultura do feijão e o ciclo da cultura do triticale (Tabela 7). O início do monitoramento dos componentes do balanço de água no solo para as plantas de cobertura se deu aos 31 dias após a emergência (31 DAE) do sorgo-forrageiro e aos 29 DAE do feijão-deporco, visto que a semeadura e emergência das plântulas não ocorreram simultaneamente. E para as culturas do feijão e do triticale o monitoramento ocorreu aos 9 DAE e aos 15 DAE, respectivamente, englobando da fase vegetativa à maturação dos grãos.

Tabela 7. Períodos de avaliação do balanço de água no solo.

Período	Entressafra/Safra	Data inicial	Data final	Nº de dias
1	Plantas de cobertura + pousio	25/10/2018	23/11/2018	30
2	Feijão	12/01/2019	21/03/2019	69
3	Triticale	02/05/2019	29/08/2019	120

Para o balanço de água no solo utilizou-se a equação da conservação de massa, segundo a qual a soma algébrica dos fluxos de água num determinado volume de controle de solo é igual à variação da armazenagem de água obtida neste volume, num certo intervalo de tempo (ROSE; STERN, 1967). O volume de solo considerado para o balanço de água no solo tem como limite superior a superfície do solo e como limite inferior uma profundidade abaixo do sistema radicular da cultura de interesse. Desta forma, para o presente estudo, o volume de controle de solo considerado foi o volume delimitado pela superfície do solo ($z = 0,00$ m) e a superfície à profundidade de 0,70 m ($z = L = 0,70$ m), no caso das plantas de cobertura, e o volume delimitado pela superfície do solo ($z = 0,00$ m) e a superfície à profundidade de 0,80 m ($z = L$

= 0,80 m), no caso das culturas do feijão e do triticale, assumindo que abaixo das profundidades de 0,70 e 0,80 m, não haveria influência dos sistemas radiculares das culturas estudadas.

A equação do balanço de água no solo para uma camada de solo 0,00 – L m de espessura, durante um intervalo de tempo $t_1 - t_0$, pode ser assim escrita como (LIBARDI, 2012):

$$P + R_e + R'_e - R_s - R'_s + I - ET_r + AC - D = \Delta h_L \quad [12]$$

em que, P é a precipitação pluvial; I é a irrigação; ET_r é o fluxo de água por evapotranspiração; AC e D é a ascensão capilar ou a drenagem interna em $z = L$; R_e é o deflúvio superficial de entrada; R'_e é o deflúvio subsuperficial de entrada; R_s é o deflúvio superficial de saída; R'_s é o deflúvio subsuperficial de saída e Δh_L é a variação de armazenagem de água no perfil de 0 a L m de profundidade no período $t_1 - t_0$. A unidade destes processos é mm de água.

No entanto, para fins deste estudo, os componentes irrigação, e deflúvios superficial e subsuperficial foram desconsiderados com segurança, visto que a área não é irrigada e as condições do terreno quanto à sua inclinação e a taxa de infiltração do solo no local do experimento permitem que estes deflúvios sejam desprezados, sem que acarrete erros significativos. Portanto, a equação (12) do balanço de água no solo foi reduzida para a equação (13) e esquematizada na figura 15:

$$P - ET_r + AC - D = \Delta h_L \quad [13]$$

Figura 15. Esquema ilustrativo dos componentes do balanço de água no solo do presente estudo, em que P é a Precipitação; ET_r é a evapotranspiração; AC é a ascensão capilar; D é a drenagem interna e Δh_L é a variação de armazenagem de água no perfil de 0 a L m de profundidade.

Para determinação dos processos D e AC da equação do balanço da água no solo, o equipamento mais utilizado é o tensiômetro. Dentre os tensiômetros existentes no mercado, o de manômetro de mercúrio tem a vantagem da sua alta sensibilidade e é considerado como padrão sendo o mais recomendado para pesquisas de movimento da água no solo (ROCHA, 2004).

Os tensiômetros, no caso deste estudo, foram construídos manualmente utilizando-se tubos de PVC com 1/2" de diâmetro e comprimentos correspondentes à profundidade de instalação, acrescidos de 0,20 m (parte localizada acima da superfície do solo). Na extremidade em contato com o solo foram fixadas as cápsulas porosas com cola, garantindo a perfeita vedação. Na outra extremidade, acima da superfície do solo, era introduzida no interior do tubo uma rolha de borracha e na parte externa do tubo feita rosca para melhorar a vedação fixando uma tampa acima da rolha, também em PVC. Foi feito, com auxílio de uma furadeira, um furo a 0,30 m do limite superior do tubo de PVC, para conexão de um tubo de "nylon" de diâmetro interno de 1,50 mm denominado "espaguete". Para vedação eficiente no PVC, o espaguete foi introduzido no orifício em uma peça confeccionada em silicone que foi colada ao tubo de PVC.

O suporte do manômetro de mercúrio foi confeccionado em madeira e moldado para acondicionar a cubeta de acrílico e o espaguete. Na cubeta fez-se uma marca para o nível de mercúrio antes da ativação dos tensiômetros. Os componentes do tensiômetro e o detalhes de sua montagem estão apresentados na figura 16.

Figura 16. Componentes do tensiômetro com manômetro de mercúrio.

Previamente à confecção dos tensiômetros, foi determinada a condutância hidráulica das cápsulas porosas com o objetivo de selecionar as de valores de condutância mais próximos no intuito de evitar erro instrumental das medidas. O interesse foi utilizar cápsulas com condutância a mais alta possível, pois esta propriedade determina a velocidade de resposta do tensiômetro (LIBARDI, 2012). As cápsulas permaneceram saturadas por 24 horas e a determinação da condutância foi determinada pelo método da carga decrescente utilizando um tubo de vidro de aproximadamente 0,80 m de comprimento fixado ao gargalo da cápsula, com a condutância sendo calculada pela equação (14):

$$C = \frac{a \cdot \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right)}{t_2 - t_1} \quad [14]$$

em que, C é a condutância hidráulica (m^2/s); a é a área da seção transversal do tubo de vidro (m^2); H_1 e H_2 são as cargas hidráulicas (m de água) na cápsula nos tempos t_1 e t_2 , respectivamente.

Foram confeccionados um total de 46 tensiômetros com 7,00 m de tubo de “nylon” transparente e dezenove suportes de madeira com cubeta para mercúrio e régua milimetrada fixada para a leitura do manômetro de mercúrio. Após confecção, os tensiômetros foram instalados no campo.

Para proceder ao balanço utilizando a equação 13, todas as parcelas experimentais foram instrumentalizadas com 2 tensiômetros às profundidades de 0,60 e 0,80 m no caso das plantas de cobertura e 0,70 e 0,90 m no caso das culturas do feijão e do triticale. Os tensiômetros foram instalados à 0,10 m de distância das plantas na linha de plantio (Figura 17A).

Para instalação utilizou-se trado de rosca específico para que o tamanho do orifício no solo fosse equivalente ao diâmetro de 1/2" do tubo de PVC, permitindo assim um contato perfeito do solo com a cápsula porosa. Para evitar o fluxo preferencial de água pela parede externa do tubo de PVC do tensiômetro foram recortadas peças circulares de câmara de pneu comumente chamadas de “manchão” e colocadas nos tensiômetros sobre a superfície do solo (Figura 17B).

Figura 17. (A): Disposição dos tensiômetros em relação a planta **(B):** Manchão de borracha colocado nos tensiômetros para evitar o fluxo preferencial de água.

Os manômetros de mercúrio foram instalados na bordadura das parcelas experimentais, evitando assim o pisoteio da área cultivada para leitura diária dos tensiômetros. Desta forma, os tubos de PVC com as cápsulas localizaram-se a 5,00 m de distância dos manômetros e os tubos de nylon, que conectam os tubos de PVC às cubetas de mercúrio, ficaram por debaixo do solo. Na figura 18, apresenta-se o esquema ilustrativo dos tensiômetros instalados no campo. A partir da instalação, os tensiômetros foram ativados por meio do seu preenchimento com água e posterior fluxagem para retirada de ar do sistema e, então iniciaram-se as leituras diárias nos períodos citados na tabela 7. As leituras eram realizadas entre 7:00 e 8:00 e os tensiômetros eram fluxados semanalmente para eliminação de bolhas de ar liberadas por causa do aumento da tensão da água com a diminuição do conteúdo de água no solo.

Figura 18. Esquema ilustrativo da disposição dos tensiômetros com manômetro de mercúrio em cada parcela experimental.

A contabilização da entrada de água por precipitação pluvial P , durante o intervalo de tempo $t_1 - t_0$, foi realizada por meio de um pluviômetro instalado na área experimental e os valores obtidos encontram-se no Apêndice E.

A drenagem interna D e a ascensão capilar C no intervalo de tempo $t_1 - t_0$ foram estimadas a partir da densidade de fluxo diária na profundidade L , pela equação de Darcy-Buchingham:

$$q_L = -K(\theta) \frac{\partial \phi_t}{\partial z} \quad [15]$$

em que, q_L é a densidade de fluxo da água no solo (mm dia^{-1}) na profundidade L ; K é a condutividade hidráulica (mm dia^{-1}) função do conteúdo de água θ , na profundidade L e $\partial \phi_t / \partial z$ é o gradiente de potencial total na direção vertical (mm mm^{-1}), também na profundidade L .

Reportando-se à figura 18, o gradiente de potencial total da água no solo foi obtido pela diferença entre o potencial total na profundidade L_2 e o potencial total na profundidade L_1 , dividido pela distância vertical entre eles as duas profundidades, isto é, $(\Delta L = L_1 - L_2)$. Assim, a equação de Darcy-Buchingham (15), utilizada neste estudo para a medida da densidade de fluxo da água na profundidade L foi:

$$q_L = -K_L(\theta) \frac{\phi_t(L_2) - \phi_t(L_1)}{\Delta L} \quad [16]$$

em que, $\phi_t(L_2)$ é o potencial total na profundidade L_2 m e $\phi_t(L_1)$ é o potencial total na profundidade L_1 m.

Por meio das leituras da altura de mercúrio dos tensiômetros H , realizadas diariamente, as quais, juntamente com a distância da superfície do solo à superfície do mercúrio na cubeta h_c e a profundidade de instalação da cápsula porosa (L_1 ou L_2 na Figura 18), o potencial mátrico da água no solo em cada profundidade era obtido pela equação 17:

$$\phi_m = -12H + h_c + L_1 \text{ (ou } L_2) \quad [17]$$

Como o potencial total da água no solo ϕ_t (m água) é a soma do potencial mátrico da água no solo ϕ_m , dado pela equação (17), e do potencial gravitacional da água no solo ϕ_g , medido considerando-se a referência gravitacional localizada à superfície do solo. Com isso, resulta que, para qualquer profundidade:

$$\phi_t = -12H + h_c \quad [18]$$

Assim, pela equação (18), foram obtidos os valores diários de ϕ_t em $L_1 = 0,80$ m e $L_2 = 0,60$ m, no caso das plantas de cobertura, e os valores diários de ϕ_t em $L_1 = 0,90$ m e $L_2 = 0,70$ m, no caso das culturas de feijão e do tritcale, a serem aplicados na equação (16) para o cálculo dos gradientes de ϕ_t diários em $L = 0,70$ m (plantas de cobertura) e $L = 0,80$ m (culturas do feijão e tritcale). Os valores diários de K em $L = 0,70$ m (plantas de cobertura) e em $L = 0,80$ m (culturas do feijão e tritcale), a serem também aplicados na equação (16), foram obtidos a partir dos valores diários de ϕ_m nas profundidades L_1 e L_2 pela equação (17) os quais eram convertidos em conteúdo de água θ por meio das curvas de retenção da água nas respectivas profundidades L_1 e L_2 do solo; as médias diárias destes valores diários de θ em L_1 e L_2 foram aplicadas nas respectivas equações da função $K(\theta)$ das respectivas profundidades: $L = 0,70$ m (plantas de cobertura) e $L = 0,80$ m (culturas do feijão e tritcale). Com os valores diários de K e do gradiente de ϕ_t , na profundidade L , ao longo do ciclo das culturas, obtiveram-se os valores de q_L pela equação (16), cujos resultados se encontram no Apêndice E.

Como se pode notar na equação (13), seu segundo membro é a quantidade de água armazenada no solo até a profundidade L , entre o tempo t_1 e o tempo t_0 , isto é, a variação da armazenagem de água Δh_L , a qual pode ser determinada pela equação (19):

$$\Delta h_L = (\bar{\theta}_1 - \bar{\theta}_0) L \quad [19]$$

em que, $\bar{\theta}_1$ é o conteúdo volumétrico de água médio na camada de solo $0,00 - L$ m no tempo t_1 e $\bar{\theta}_0$ é o conteúdo de água volumétrico médio na camada de solo $0,00 - L$ m no tempo t_0 .

Necessita-se, portanto, das diferenças de conteúdo de água médio nos tempos t_1 e t_0 . Assim, a armazenagem de água foi determinada a cada 7 dias, aproximadamente, para o ciclo das plantas de cobertura e a cada 15 dias, aproximadamente, para o ciclo das culturas do feijão e do triticales, a partir de perfis de conteúdo de água nas camadas de $0,00-0,20$, $0,20-0,40$, $0,40-0,60$, $0,60-0,80$ e $0,80-1,00$ m e calculada pela equação (20):

$$h_L = \bar{\theta}_t L \quad [20]$$

utilizando a regra do trapézio de integração numérica, sendo h_L a armazenagem de água na camada $0 - L$ m, com $L = 0,70$ m (plantas de cobertura) e $L = 0,80$ m (culturas do feijão e triticales); e $\bar{\theta}_t$ o conteúdo de água volumétrico de água médio da camada $0,00 - L$ m, no tempo t . A partir das armazenagens em cada tempo, t_0 e t_1 , calculou-se a variação de armazenagem na camada $0,00 - L$ m pela equação (19).

A evapotranspiração real ET_r foi determinada considerando-a como a incógnita da equação simplificada do balanço de água (Equação 13). Os sub-períodos de avaliação do balanço de água no solo para os ciclos das plantas de cobertura e das culturas do feijão e do triticales estão apresentados na tabela 8.

Tabela 8. Sub-períodos de avaliação do balanço de água no solo.

Número do período	Data inicial	Data final	Total de dias
Plantas de cobertura			
1	25/10/2018	07/11/2018	14
2	08/11/2018	14/11/2018	7
3	15/11/2018	23/11/2018	9
Feijão			
1	12/01/2019	29/01/2019	18
2	30/01/2019	11/02/2019	13

3	12/02/2019	04/03/2019	21
4	05/03/2019	21/03/2019	17
Triticale			
1	02/05/2019	21/05/2019	20
2	22/05/2019	04/06/2019	14
3	05/06/2019	18/06/2019	14
4	19/06/2019	02/07/2019	14
5	03/07/2019	16/07/2019	14
6	17/07/2019	30/07/2019	14
7	31/07/2019	13/08/2019	14

Com os dados do rendimento de grãos do feijão e do triticale foi determinada a eficiência do uso da água pela razão deste rendimento e a quantidade de água consumida pelas culturas ao longo do ciclo, representada pela evapotranspiração real estimada pela equação do balanço de água no solo, ou seja:

$$EUA = \left(\frac{R}{ET_r} \right) \quad [21]$$

em que, EUA é eficiência de uso da água (kg m^{-3}); R é o rendimento de grãos (kg ha^{-1}) e ET_r é a evapotranspiração real ou consumo de água expresso em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$.

3.11 Massa Seca das Plantas de Cobertura

Para obter a massa da matéria seca das plantas de cobertura foram coletadas plantas de uma área útil de $2,00 \text{ m}^2$ de cada parcela. As plantas foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 65°C por 72 horas e pesadas em balança de precisão.

3.12 Componentes de Rendimento das Culturas do Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e do Triticale (*Triticosecale rimpaii* L.)

Para determinar os componentes de rendimento da cultura do feijão, foram amostradas 3 linhas de $1,50 \text{ m}$ de cada parcela experimental, contabilizando uma área útil de $2,025 \text{ m}^2$. Foi computado o número de plantas por linha e o número de vagens por planta. As vagens foram armazenadas em sacos de papel para posterior trilhagem e obtenção do peso dos grãos úmidos. Os grãos foram secos a 105°C por 24 horas e foi realizada a correção da umidade para 13%. O peso dos grãos foi transformado em Mg ha^{-1} .

Para determinar os componentes de rendimento da cultura do triticale foram escolhidos, aleatoriamente, três pontos de $1,00 \text{ m}^2$ em cada parcela experimental, contabilizando uma área total de $3,00 \text{ m}^2$. As plantas foram cortadas rente ao solo e acondicionadas em sacos de papel para posterior contagem do número de plantas e posterior trilhagem e obtenção do peso dos

grãos úmidos. Os grãos foram secos a 105°C por 24 horas e foi realizada a correção da umidade para 13%. O peso dos grãos foi transformado em Mg ha⁻¹.

3.13 Análise dos Dados

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade (SHAPIRO; WILK, 1965) e homocedasticidade (BARTLETT, 1937). Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância, sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,10$) utilizando o software R (R CORE TEAM, 2016).

4. RESULTADOS

4.1 Alterações nas Propriedades Físicas do Solo

Antes do preparo convencional do solo para interrupção do plantio direto cultivado por longo período de tempo, foi realizado ensaio de resistência do solo à penetração das raízes (RP) para averiguação do estado de compactação do solo. No mesmo momento da realização deste ensaio foi medido o conteúdo de água no solo. Os valores obtidos de RP não foram afetados pelo conteúdo de água no solo visto que, para este último não foi verificada diferença estatística (Figura 19).

Os valores de RP obtidos antes do preparo do solo, provenientes de um histórico de 13 anos de PD, demonstram que o solo não apresentava compactação que limitasse o desenvolvimento de plantas ($< 2,00$ MPa, de acordo com TAYLOR et al., 1966), independentemente do tipo da planta de cobertura utilizada, evidenciando que a adoção de sistemas de rotação de culturas, em especial sob plantio direto indica bom potencial de melhoria das condições físicas do solo para o crescimento das plantas (ANDRADE et al., 2009).

Figura 19. (A): Médias da resistência do solo à penetração dos tratamentos experimentais antes do preparo do solo. (B): Conteúdo de água no solo no momento de execução do ensaio de resistência do solo à penetração. Barras horizontais em cada ponto indicam o intervalo de confiança da média ($p \leq 0,10$).

Após o preparo do solo, percebe-se que o sistema de preparo influenciou os valores de resistência à penetração da camada de 0,00-0,15 m de profundidade (Figura 20), para a qual, menor RP foi verificada em todas as coberturas sob o PC (Figura 20A). Estas diferenças devido ao preparo do solo ocorreram por causa da pulverização do solo e do desarranjo dos

agregados os quais, ao serem atingidos pela extremidade do penetrômetro, quebravam-se com facilidade (BEUTLER et al., 2001).

Embora saiba-se que os solos sob PD, com elevado teor de argila, sofram compactação em sua superfície (SECCO et al., 2000), não se pode afirmar que o solo sob o PD do presente estudo estivesse compactado, pois os valores obtidos de RP não indicam a ocorrência deste processo, o qual é classificado como moderado no PD e baixo no PC até a profundidade de 0,15 m, conforme a classificação da Soil Survey Staff (ARSHAD et al., 1996).

Os maiores conteúdos de água no solo sob PD em relação ao sob PC, embora não constatada diferença significativa, podem ter influenciado os resultados obtidos. Idealmente é sugerido que a avaliação da resistência à penetração seja efetuada quando as áreas estejam com o mesmo conteúdo de água e que este seja o mais próximo possível da capacidade de campo do solo (ARSHAD et al., 1996), pois com a redução do conteúdo de água no solo há aumento na resistência à penetração decorrente da maior coesão entre as partículas (BELTRAME et al., 1981). No entanto, em experimentos de campo isto quase nunca é possível, visto que o próprio manejo do solo altera a dinâmica da água, dificultando comparações entre sistemas de manejo.

A partir da profundidade de 0,15 m são observadas diferenças pontuais em cada camada de solo em profundidade, destacando-se: na camada 0,15-0,20 m o PD-Pousio apresentou maior RP em relação ao PC-Pousio, ainda pela influência da ausência/presença de preparo do solo, respectivamente; a partir da camada de 0,20-0,25 m, o comportamento das curvas de resistência à penetração é invertido e o PC passa a apresentar maior RP em todas as camadas subsequentes; na camada de 0,25-0,30 m o PC-Gramínea e o PC-Leguminosa apresentaram RP superiores, em relação a todos os demais tratamentos sob PD, e o PC-Pousio foi diferente apenas do PD-Gramínea; nas camadas de 0,30-0,35 m até a camada de 0,55-0,60 m, o PC apresentou RP superior ao PD, independentemente do tipo de cobertura do solo.

Estes resultados preliminares indicam a insustentabilidade da interrupção do PD cultivado por longo período de tempo, visto que, logo após o primeiro preparo do solo os valores de RP das camadas de 0,20-0,25 e 0,25-0,30 m de profundidade em PC-Gramínea, PC-Leguminosa e PC-Pousio são superiores a 2,00 MPa, que caracterizam a ação dos discos da grade pesada e da grade niveladora e ao tráfego de máquinas, como também observado por Castro (1995) em milho e Beutler et al. (2001) em rotação com as culturas do milho e do feijão em preparo convencional do solo.

Estudos têm mostrado maior resistência à penetração em sistemas de manejo sob plantio direto em relação ao preparo convencional do solo, a partir da profundidade de 0,15 m (BEUTLER et al., 2001; COSTA et al., 2003; SILVA et al., 2009) e outros o contrário,

concordando com os resultados encontrados no presente estudo (SILVA et al., 2000). Para Beutler et al. (2001) estes aspectos estão relacionados ao tráfego de máquinas e à ação dos implementos agrícolas utilizados no preparo do solo, além do tempo diferencial de condução dos ensaios.

Figura 20. (A): Médias da resistência do solo à penetração dos tratamentos experimentais após o preparo do solo. **(B):** Conteúdo de água no solo no momento de execução do ensaio de resistência do solo à penetração. Barras horizontais em cada ponto indicam o intervalo de confiança da média ($p \leq 0,10$).

As médias da densidade do solo, porosidade, macroporosidade, microporosidade e resistência do solo à penetração das raízes encontram-se no Apêndice F. Os resultados do teste F e o coeficiente de variação para estes atributos do solo estão apresentados no Apêndice G.

Os efeitos simples de preparo e cobertura do solo foram significativos na macroporosidade e RP, e na microporosidade e RP, respectivamente, ao final do ciclo das plantas de cobertura. O desdobramento da interação preparo $\times$ cobertura do solo levaram a resultados significativos apenas para a microporosidade na camada de 0,10-0,20 m de profundidade e RP nas camadas de 0,00-0,05 e 0,10-0,20 m de profundidade.

Nota-se maior macroporosidade nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m de profundidade e menor RP nas camadas de 0,05-0,10 e 0,20-0,30 m de profundidade no PC (Tabela 9). Este efeito já era esperado devido ao revolvimento do solo neste sistema de preparo. Por outro lado, a ausência de mobilização do solo no PD diminuiu a macroporosidade e aumentou a RP em relação ao PC. Silveira et al. (2008) também encontraram menor macroporosidade no PD em relação ao PD arado anualmente, que se assemelha ao PC do presente estudo. No entanto, o solo em ambos os sistemas de preparo não apresentou

macroporosidade inferior a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, considerado o valor crítico ao desenvolvimento de plantas e difusão de oxigênio (XU et al., 1992).

Tabela 9. Efeito simples do preparo do solo nas médias da macroporosidade e da resistência do solo à penetração ao final do ciclo das plantas de cobertura nas camadas avaliadas.

Preparo	Camada (m)			
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)				
PC	0,21 a	0,22 a	0,14 a	0,19 a
PD	0,18 b	0,19 b	0,19 a	0,19 a
Resistência do solo à penetração ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)				
PC	0,67 a	0,74 b	0,84 a	0,74 b
PD	0,78 a	0,81 a	0,84 a	0,82 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade.

Os baixos valores de RP encontrados nos anéis metálicos em cada ciclo de cultivo são explicados pelo elevado conteúdo de água no momento da condução dos ensaios de resistência à penetração. À medida que há incremento do conteúdo de água no solo há redução das forças de adsorção que resultam na redução do contato entre as partículas do solo (LIBARDI, 2012).

Verifica-se modificação da microporosidade na camada de 0,00-0,05 m de profundidade e da RP na camada de 0,05-0,10 m de profundidade em função da planta de cobertura utilizada (Tabela 10). Maior microporosidade foi verificada quando se utiliza a gramínea em relação à leguminosa. Já a área que permaneceu sem cobertura se igualou as demais coberturas, provavelmente devido ao fato de ter ocorrido o desenvolvimento de uma gama de espécies daninhas de diversas composições (Tabela 4). Para a RP, o efeito significativo de cobertura foi notado na camada de 0,05-0,10 m de profundidade, onde a gramínea apresentou valores de RP superiores, seguido da leguminosa e da área sob pousio. Isso pode ser explicado pois, as espécies de gramíneas apresentam sistema radicular volumoso e agressivo e com alto potencial de fixação de carbono e, por isso, quando utilizados como plantas de cobertura podem melhorar a porosidade e a agregação do solo em médio e longo prazos (IGUE, 1984, DIAS JÚNIOR, 2000).

Tabela 10. Efeito simples da cobertura do solo nas médias da microporosidade e da resistência do solo à penetração ao final do ciclo das plantas de cobertura nas camadas avaliadas.

Cobertura	Camada (m)			
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30

		Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)		
Gramínea	0,41 a	0,37 a	0,40 a	0,38 a
Leguminosa	0,35 b	0,33 a	0,37 a	0,37 a
Pousio	0,39 ab	0,39 a	0,40 a	0,38 a
		Resistência do solo à penetração ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)		
Gramínea	0,76 a	0,86 a	0,87 a	0,79 a
Leguminosa	0,68 a	0,77 ab	0,81 a	0,81 a
Pousio	0,75 a	0,72 b	0,85 a	0,76 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade.

Por meio do desdobramento da interação significativa, nota-se que a microporosidade na camada de 0,10-0,20 m de profundidade foi superior em PC-Leguminosa em relação ao PD-Leguminosa e este último foi inferior ao PD-Gramínea e ao PD-Pousio (Figura 21). Embora não constatadas diferenças estatísticas, Andrade et al. (2009) também observaram menores microporosidades em sistemas que utilizaram leguminosas em relação a gramíneas.

Figura 21. Médias da microporosidade do solo na camada de 0,10-0,20 m de profundidade nos tratamentos experimentais ao final do ciclo das plantas de cobertura. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Com relação à RP, para o desdobramento da interação, nota-se que o PC-Pousio foi inferior ao PD-Pousio na camada de 0,00-0,05 e 0,10-0,20 m de profundidade (Figura 22A e Figura 22B) devido ao preparo do solo, assim como já constatado na figura 20, e a RP do PD-Leguminosa foi inferior ao do PC-Leguminosa (Figura 22B). Dentro de cada preparo do solo a RP seguiu a seguinte ordem: Gramínea = Leguminosa $\geq$ Pousio na camada de 0,00-0,05 m de profundidade (Figura 22A) e Gramínea $\geq$ Leguminosa $>$ Pousio na camada de 0,10-0,20 m de profundidade (Figura 22B).

A maior RP encontrada nos tratamentos sob cobertura de gramínea pode ser explicada pelo seu sistema radicular abundante que está relacionado, direta ou indiretamente, na estabilização do solo, pois protege os agregados (ALVARENGA et al., 1995). Além disso, a utilização de gramíneas como plantas de cobertura, sobretudo com a utilização da rotação de culturas, protege a superfície do solo com a presença de resíduos vegetais, e proporciona aumento do movimento de água e de difusão de gases por meio de canais que se formam pela decomposição das raízes (MÜLLER et al., 2001).

Figura 22. Médias da resistência do solo à penetração nos tratamentos experimentais ao final do ciclo das plantas de cobertura. **(A):** camada de 0,00-0,05 m de profundidade. **(B):** camada de 0,10-0,20 m de profundidade. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Para o ciclo da cultura do feijão nota-se que o efeito simples de preparo do solo foi significativo para todos os atributos físicos, com exceção da microporosidade (Tabela 11). Segundo Dal Ferro et al. (2014), a microporosidade possui baixa sensibilidade para detectar alterações na estrutura do solo induzidas pelo manejo. No entanto, o efeito simples de cobertura do solo foi significativo na microporosidade e RP (Tabela 12). Embora significativos os efeitos observados nos sistemas de cultivos avaliados, as diferenças foram numericamente pequenas.

Não houve efeito significativo para o efeito da interação preparo x cobertura do solo em nenhum atributo físico do solo para o ciclo da cultura do feijão.

A densidade do solo foi superior no PC nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade e, conseqüentemente, a porosidade foi menor em relação ao PD. A macroporosidade superior no PD na camada de 0,05-0,10 m de profundidade é consequência da maior porosidade e menor RP (Tabela 11). Portanto, o cultivo do feijão sob as plantas de coberturas promoveu certa alteração na estrutura do solo no PC, onde se observa início do processo de compactação decorrente, sobretudo, do rompimento da estrutura ocasionado por duas mobilizações consecutivas do solo e posterior rearranjo da estrutura do solo.

Tabela 11. Efeito simples de preparo do solo nas médias da densidade do solo, porosidade, macroporosidade e da resistência do solo à penetração ao final do ciclo da cultura do feijão nas camadas avaliadas.

Preparo	Camada (m)			
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
Densidade do solo (kg m^{-3})				
PC	1169,92 a	1298,03 a	1331,94 a	1273,89 a
PD	1191,03 a	1238,10 b	1243,73 b	1244,10 a
Porosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				
PC	0,60 a	0,56 b	0,55 b	0,57 a
PD	0,60 a	0,58 a	0,58 a	0,58 a
Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				
PC	0,23 a	0,18 b	0,16 a	0,20 a
PD	0,23 a	0,21 a	0,20 a	0,21 a
Resistência do solo à penetração (MPa)				
PC	0,68 a	0,81 a	0,85 a	0,78 a
PD	0,69 a	0,74 b	0,78 a	0,75 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade.

No presente estudo, ao contrário do que normalmente é praticado, a área com 13 anos de PD foi interrompida por meio do preparo convencional do solo, onde se utilizou grade aradora e niveladora para rompimento da estrutura do solo. Neste sentido, o solo sob PD consolidado já apresentava propriedades físicas adequadas ao desenvolvimento de culturas agrícolas, decorrentes da manutenção de cobertura do solo com material vegetal que favorece a adição de matéria orgânica na superfície elevando a capacidade de suporte de carga do solo (FIDALSKI, et al., 2015).

Para o efeito das coberturas do solo no cultivo do feijão, nota-se maior microporosidade sob gramínea, seguido de leguminosa e pousio, na camada de 0,00-0,05 m de profundidade e,

na camada de 0,10-0,20 m de profundidade, a cobertura com leguminosa apresentou maior RP seguido do pousio e da gramínea (Tabela 12). Para o ciclo da cultura do triticales foi observado efeito simples de preparo do solo na macroporosidade e microporosidade (Tabela 13).

Tabela 12. Efeito simples da cobertura do solo nas médias da microporosidade e da resistência do solo à penetração ao final do ciclo da cultura do feijão nas camadas avaliadas.

Cobertura	Camada (m)			
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				
Gramínea	0,38 a	0,38 a	0,38 a	0,38 a
Leguminosa	0,37 ab	0,38 a	0,41 a	0,38 a
Pousio	0,36 b	0,37 a	0,37 a	0,37 a
Resistência do solo à penetração (MPa)				
Gramínea	0,68 a	0,76 a	0,74 b	0,78 a
Leguminosa	0,67 a	0,81 a	0,88 a	0,76 a
Pousio	0,71 a	0,76 a	0,83 ab	0,78 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade.

Tabela 13. Efeito simples do preparo do solo nas médias da macroporosidade e da microporosidade ao final do ciclo da cultura do triticales nas camadas avaliadas.

Preparo	Camada (m)			
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				
PC	0,23 a	0,20 a	0,17 a	0,19 b
PD	0,19 a	0,20 a	0,18 a	0,20 a
Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)				
PC	0,37 b	0,37 a	0,39 a	0,39 a
PD	0,39 a	0,37 a	0,39 a	0,39 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade.

O desdobramento da interação preparo x cobertura do solo foram significativos para a densidade do solo, porosidade, macroporosidade e RP na camada de 0,20-0,30 m de profundidade, e para a microporosidade na camada de 0,05-0,10 m de profundidade, onde se verifica maior densidade do solo e RP e, conseqüentemente, menor porosidade e macroporosidade em PC-Leguminosa em relação ao PD-Leguminosa na camada de 0,20-0,30 m de profundidade (Figura 23).

Figura 23. Médias dos atributos físicos do solo na camada de 0,20-0,30 m de profundidade nos tratamentos experimentais ao final do ciclo da cultura do triticale. **(A):** densidade do solo. **(B):** porosidade. **(C):** macroporosidade. **(D):** resistência do solo à penetração. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Embora nos ciclos de cultivo anteriores não tenha sido constatada diferença para a densidade do solo entre os tratamentos, observa-se tendência de aumento desta propriedade do solo ao longo dos ciclos das plantas de cobertura para a cultura do triticale em PC-Leguminosa na camada de 0,20-0,030 m de profundidade. Já em PD-Leguminosa, a densidade do solo diminuiu a cada ciclo de cultivo, na mesma camada de solo, revelando que o PD permite a preservação e melhoria da qualidade ao longo do tempo, assim como relatado por outros autores em solos tropicais (COSTA et al., 2006; CAVALIERI et al., 2009).

Os atributos físicos do solo não foram alterados no PC, demonstrando que o preparo do solo com grade aradora e niveladora promove a homogeneização da estrutura do solo independentemente do tipo de planta de cobertura que é incorporada. Já no PD, verifica-se maior macroporosidade no PD-Leguminosa, seguido de PD-Pousio e PD-Gramínea na camada de 0,20-0,30 m de profundidade (Figura 23C), enquanto que para a microporosidade, os maiores valores também foram encontrados em PD-Leguminosa, seguido de PD-Gramínea e PD-Pousio na camada de 0,05-0,10 m de profundidade (Figura 24).

Estudando diferentes coberturas do solo em PD, Andrade et al. (2009) também observaram aumento da macroporosidade na camada superficial (0,00-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade), do solo sob cobertura de leguminosa em relação ao solo sob cobertura de gramínea. Argenton et al. (2005) também verificaram que o uso de leguminosas como plantas de cobertura em rotação com gramíneas demonstrou ser uma prática benéfica para as propriedades relacionadas com a estrutura do solo, visto que aumentou a macroporosidade e a porosidade e reduziu a densidade do solo, quando comparada com rotação incluindo somente gramíneas.

O valor de densidade do solo considerado limitante para o crescimento de culturas em Latossolos argilosos brasileiros ($1330,00 \text{ kg m}^{-3}$), segundo Reichert et al. (2009), foi encontrado no PD-Pousio na camada de 0,05-0,10 m de profundidade no ciclo das plantas de cobertura, demonstrando a importância da manutenção da cobertura do solo com restos vegetais em sistemas de manejo que não mobilizam a superfície do solo. Tal valor limitante também foi encontrado no PC-Leguminosa no ciclo do feijão na camada de 0,05-0,10 m de profundidade, no PC-Leguminosa e no PC-Pousio na camada de 0,10-0,20 m de profundidade e no PC-Gramínea e PC-Leguminosa no ciclo do feijão na camada de 0,20-0,30 m de profundidade. Apesar deste valor de densidade do solo limitante, não foram observadas macroporosidades abaixo do limite crítico ($0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) para aeração adequada do solo.

Figura 24. Médias da microporosidade na camada de 0,05-0,10 m de profundidade nos tratamentos experimentais ao final do ciclo da cultura do tritcale. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Para a avaliação dos atributos físicos do solo ao longo dos ciclos de cultivo, percebe-se, no presente estudo, que o uso contínuo do plantio direto de 13 anos melhorou a qualidade física do solo, principalmente nas camadas mais profundas em relação ao preparo convencional do solo que, embora, na maioria das vezes, não tenha apresentado condições limitantes ao desenvolvimento das plantas, deve ser evitado, pois o revolvimento do solo promove a incorporação do material vegetal, altera a agregação, que retém a maior parte dos nutrientes necessários às plantas, deixando a superfície do solo exposta aos agentes de erosão (WÜRSCHÉ; DENARDIN, 1980).

A manutenção de resíduos culturais na superfície do solo, sob PD, promove condições distintas às propriedades do solo, em relação à sua incorporação nos solos sob preparo convencional (HOLTZ, 1995). O preparo convencional do solo, devido a transmissão da pressão realizada na superfície do solo pelas máquinas e equipamentos agrícolas, pela compressão exercida pela lâmina dos discos do arado, bem como do pneu do trator rodando no sulco de aração, causa a compactação do solo nas camadas subsuperficiais, conhecida como “pé-de-grade” e “pé-de-arado” ao longo do tempo, limitando o crescimento das plantas (CAMARGO, 1983; COSTA et al., 2003), além de mudanças do regime hídrico do solo, da temperatura do solo e da distribuição de nutrientes no solo (MUZILLI, 1983).

Resultados semelhantes ao presente estudo foram encontrados por Moraes et al. (2016) que observaram que o sistema de plantio direto de longo prazo (22 anos) preservou a qualidade estrutural de Latossolos argilosos do sul do Brasil ao longo do tempo e forneceram condições físicas adequadas para o crescimento das culturas. Por outro lado, os sistemas convencionais de

preparo do solo levaram a uma estrutura pobre do solo, principalmente na camada de 0,20-0,30 m de profundidade.

Os efeitos da cobertura do solo e rotação de culturas nos atributos físicos foram pequenos, e provavelmente são explicados por sua baixa sensibilidade às mudanças na estrutura do solo induzidas pelos sistemas de cultivo, sendo necessários mais estudos usando indicadores de qualidade física mais sensíveis ou sistemas de cultivo mais diversificados.

Sabe-se que os efeitos do preparo do solo nas propriedades físicas do solo dependem do tempo, espaço e manejo (TANGYUAN et al., 2009, WANG; SHAO, 2013, MUNKHOLM et al., 2013, DERPSCH et al., 2014) e são determinados por vários fatores, como clima (MUNKHOLM et al., 2013), textura do solo (ALVAREZ; STEINBACH, 2009), camada do solo (WU et al., 1992), tempo de amostragem (TANGYUAN et al., 2009), conteúdo de matéria orgânica (MAHBOUBI et al., 1993), sistemas de cultivo (MUNKHOLM et al., 2013) e intensidade do tráfego de máquinas (MAHBOUBI et al., 1993), levando a discrepâncias geralmente observadas nos resultados.

Além disso, é importante considerar que a magnitude dos efeitos do revolvimento do solo na qualidade estrutural é altamente dependente da variabilidade e sensibilidade dos atributos físicos utilizados (MORAES et al., 2016). Por isso, experimentos de manejo do solo devem ser realizados a longo prazo, em regiões de importância para as culturas, com o intuito de esclarecer os efeitos combinados de todos os fatores ao longo do tempo, para que então, resultados claros e concisos quanto ao efeito do preparo do solo na qualidade física do solo possam ser mensurados (BA et al., 2014; MORAES et al., 2016).

Nesse contexto, o PD tem sido considerado uma das práticas de manejo mais importantes para atender às demandas agrícolas futuras de forma sustentável (DERPSCH et al., 2014) e, ao mesmo tempo, preservar a qualidade do solo, reduzindo a erosão (LAL, 2007) e aumentando o teor de carbono orgânico do solo (ZOTARELLI et al., 2012), a estabilidade de agregados (ALVAREZ; STEINBACH, 2009), a biodiversidade (ADL et al., 2005) e a atividade biológica (BABUJIA et al., 2010).

4.2 Balanço de Água no Solo

4.2.1 Plantas de cobertura

A precipitação pluvial ocorrida no período de desenvolvimento das plantas de cobertura (484,0 mm) foi 156,0 mm superior a série histórica de precipitação de 25 anos para o mesmo período, o que permitiu o desenvolvimento das plantas de cobertura para obtenção de massa seca, sem que houvessem limitações por déficit hídrico.

Os resultados do teste F e o coeficiente de variação para a massa seca das plantas de cobertura encontram-se no Apêndice I. Embora estatisticamente não foram observadas diferenças entre os tratamentos experimentais para o desdobramento da interação preparo $\times$ cobertura, nota-se que há uma tendência de maior produção de massa seca no solo sob PC, possivelmente, devido à maior velocidade de germinação das sementes sob este preparo do solo (Figura 25). Ou seja, na ocasião do manejo mecânico das plantas de cobertura, que ocorreu aos 65 DAE do sorgo-forrageiro e aos 63 DAE do feijão-de-porco, as plantas sob o PC estavam em estágio de desenvolvimento mais avançado do que as plantas sob PD.

Os valores de produção de massa seca do sorgo-forrageiro ($7,63 \text{ Mg ha}^{-1}$ sob PC e $6,42 \text{ Mg ha}^{-1}$ sob PD) foram inferiores ao obtido por outros autores, enquanto que para o feijão-de-porco ($7,00 \text{ Mg ha}^{-1}$ sob PC e $6,68 \text{ Mg ha}^{-1}$ sob PD) encontram-se diversificadas produções de massa seca na literatura. Correia e Durigan (2008) cultivaram plantas de cobertura no verão sob Latossolo Vermelho-Amarelo de textura argilosa e observaram que a produção de massa seca do feijão-de-porco cultivado no verão foi de $8,80 \text{ Mg ha}^{-1}$ no ano de 2003, quando a precipitação do período foi de 278,0 mm e de $9,40 \text{ Mg ha}^{-1}$ no ano de 2004 (25% superior ao do presente estudo), quando a precipitação do período foi de 423,0 mm.

Figura 25. Médias da massa seca das plantas de cobertura nos tratamentos experimentais. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Produção de massa seca do feijão-de-porco de $3,43 \text{ Mg ha}^{-1}$ e do sorgo-forrageiro de $15,48 \text{ Mg ha}^{-1}$ foi observado por Oliveira et al. (2002) em Argissolo Vermelho-Amarelo de textura média sob plantio direto. Alvarenga et al. (1995) obtiveram $5,53 \text{ Mg ha}^{-1}$ de massa seca do feijão-de-porco em Argissolo Vermelho-Amarelo de textura argilosa a muito argilosa sob

preparo convencional do solo e Menezes e Leandro (2004) de 8,00 Mg ha⁻¹ em Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média.

As diferenças no rendimento de matéria seca das plantas de cobertura, nos diversos locais, podem estar associadas às condições edafoclimáticas (MENEZES; LEANDRO, 2004) e ao tempo que permanecem no campo para o corte, sendo que os níveis mais altos de palha produzidos, provavelmente têm impactos significativos no sistema agrícola (WARD et al., 2012). Neste sentido, Alvarenga et al. (1995) destacam o feijão-de-porco para a conservação do solo por sua velocidade de crescimento e percentagem de cobertura do solo, com grande influência no processo erosivo, porque no período inicial de crescimento das culturas, o solo se encontra desprotegido e, portanto, suscetível à erosão (AMADO et al., 1987).

No período de avaliação do balanço de água (25/10/2018 a 23/11/2018) nota-se que a densidade de fluxo apresentou maiores valores quando houve maior precipitação, que se traduziu em drenagem interna (Figura 26).

Figura 26. Densidade de fluxo média da água no solo na profundidade de 0,70 m e precipitação durante o período de desenvolvimento das plantas de cobertura nos tratamentos experimentais.

Os valores máximos de densidade de fluxo encontrados foram de 5,57 mm dia⁻¹ no PC-Pousio, 3,73 mm dia⁻¹ no PC-Leguminosa e 3,66 mm dia⁻¹ no PD-Gramínea, após a chuva de maior intensidade (93,2 mm). Resultados contrastantes ao do presente estudo foram encontrados na literatura para solos de diferentes texturas. A textura do solo do presente trabalho foi classificada como argilosa a muito argilosa, de maneira que é um solo com maior capacidade de retenção de água e nutrientes e menor suscetibilidade à erosão e à lixiviação do que solos arenosos (LIMA; LIMA, 2000).

Estudando um solo de textura argilo-arenosa sob diferentes condições de manejo, Castro et al. (2002) encontraram drenagem interna de 40,00 mm dia⁻¹ em solo sob cultivo

convencional, de 25,00 mm dia⁻¹ sob plantio direto e de 180,00 mm dia⁻¹ sob solo sem cobertura. Outros autores, em solo de textura franco-argilo-arenosa, encontraram drenagem interna menor do que 4,00 mm dia⁻¹ sob o cultivo de braquiária como planta de cobertura, quando a precipitação não excedeu 20,0 mm (FERNANDES; LIBARDI, 2009), enquanto que no presente estudo, os valores de drenagem interna não excederam 1,00 mm dia⁻¹ para precipitações de até 10,0 mm.

As médias da drenagem interna/ascensão capilar (D/AC), variação da armazenagem de água no solo (Δh) e evapotranspiração real (ET_r), por sub-período integrado (ver Tabela 8) para o ciclo das plantas de cobertura, encontram-se na tabela 14.

Tabela 14. Média da drenagem interna/ascensão capilar (D/AC), variação da armazenagem de água no solo (Δh) e evapotranspiração real (ET_r) por sub-período integrado (1, 2 e 3) para o ciclo das plantas de cobertura nos tratamentos experimentais. Os valores de precipitação pluvial (P) nos períodos 1, 2 e 3 foram 120,4 mm, 2,4 mm e 59,6 mm, respectivamente.

Tratamento	1	2	3
D/AC (mm)			
PC-Gramínea	-3,7860	-0,6507	-2,1302
PC-Leguminosa	-6,3360	-0,2114	0,4797
PC-Pousio	-13,9828	-2,0024	-1,1958
PD-Gramínea	-7,1884	-0,6021	-2,8585
PD-Leguminosa	-6,0213	-0,0307	-0,1799
PD-Pousio	-6,8846	-1,2108	-3,7845
Δh (mm)			
PC-Gramínea	17,16	-21,03	24,00
PC-Leguminosa	22,00	-34,14	24,78
PC-Pousio	27,27	-39,22	39,68
PD-Gramínea	12,45	-32,25	34,88
PD-Leguminosa	9,66	-26,90	23,51
PD-Pousio	9,98	-18,39	25,00
ET_r			
PC-Gramínea	-99,46	-22,78	-49,47
PC-Leguminosa	-92,06	-36,33	-51,82
PC-Pousio	-79,14	-39,62	-45,18
PD-Gramínea	-100,77	-34,05	-45,12
PD-Leguminosa	-105,44	-29,27	-51,58
PD-Pousio	-102,91	-19,58	-49,09

O período de avaliação do balanço de água no solo para as plantas de cobertura ocorreu até a fase vegetativa da gramínea sorgo-forrageiro e início do florescimento da leguminosa feijão-de-porco. Nota-se que somente para o PC-Leguminosa houve ascensão capilar no

período 3 e para todos os demais períodos a densidade de fluxo foi negativa, traduzindo-se em drenagem interna em todos os tratamentos. Os maiores valores de drenagem interna ocorreram no PC-Pousio nos períodos 1 e 2 e no PD-Pousio no período 3.

Para a variação da armazenagem de água no solo, observa-se que para os períodos 1 e 3 os valores foram positivos, enquanto que somente para o período 2 eles foram negativos. Embora tenha ocorrido uma chuva de 93,2 mm no dia 04/11 (período 1), o período 2 não apresentou maior consumo de água (ET_r) pelas plantas. O que pode ter ocorrido é que esta chuva contribuiu para o aumento da drenagem interna e da evapotranspiração da cultura no período 1 reduzindo a armazenagem no final do período 2.

Os resultados do teste F e o coeficiente de variação para os valores totais da drenagem interna/ascensão capilar (D/AC), variação da armazenagem de água no solo (Δh) e evapotranspiração real (ET_r), de todo o período avaliado (25/10/2018 a 23/10/2018), encontram-se no Apêndice H e as médias estão apresentadas na tabela 15.

Tabela 15. Média dos valores totais da drenagem interna (D), variação de armazenagem (Δh) da água no solo e evapotranspiração (ET_r) das plantas de cobertura nos tratamentos experimentais, no período 25/10/2018 a 23/10/2018. A precipitação pluvial (P) neste período foi de 182,4 mm.

Tratamento	D (mm)	Δh (mm)	ET_r (mm)
PC-Gramínea	-6,5668	20,12	-155,71
PC-Leguminosa	-6,0677	12,65	-163,68
PC-Pousio	-17,1810	27,73	-137,49
PD-Gramínea	-10,6408	15,07	-156,68
PD-Leguminosa	-5,5103	6,27	-170,62
PD-Pousio	-10,9059	16,59	-154,91

Considerando o somatório das densidades de fluxo ocorridas em todos os períodos avaliados para as plantas de cobertura, nota-se que os maiores valores de drenagem interna ocorreram no PC-Pousio > PD-Pousio > PD-Gramínea. Estes resultados são confirmados pelo efeito simples da cobertura do solo (Tabela 16): nas áreas não cultivadas no período primavera-verão (pousio), desenvolveram-se somente plantas daninhas, onde foram obtidos os maiores valores de drenagem interna e os menores valores de ET_r . Estas observações já foram mencionadas por Ward et al. (2006), Islam et al. (2006) e Bodner et al. (2007), que afirmaram que a drenagem e a recarga das águas subterrâneas podem ser aumentadas em sistemas onde as plantas de cobertura não são usadas e que a ET_r de plantas de cobertura geralmente é mais alta em comparação com áreas sob pousio. Também foi observado menor drenagem interna e menor variação da armazenagem de água no solo e maior consumo de água nos tratamentos que utilizaram planta de cobertura leguminosa.

Neste sentido, alguns autores ressaltam que o uso de plantas de cobertura pode esgotar a disponibilidade de água no solo para as culturas comerciais seguintes, devido à sua demanda hídrica, causando possível redução da produção (MITCHELL et al., 1999, SALAKO; TIAN, 2003, NIELSEN; VIGIL, 2005).

Esperava-se melhoria na armazenagem de água no solo sob o PD devido às mudanças estruturais que ocorrem neste tipo de manejo, haja vista que, normalmente estes solos sofrem compactação em sua superfície pelo tráfego de máquinas agrícolas, enquanto solos cultivados sob PC são frequentemente revolvidos, o que altera suas propriedades físico-hídricas em curto espaço de tempo (TORMENA et al., 2004). No entanto, Dalmago et al. (2009) verificaram que em todo o perfil de solo (Argissolo Vermelho) o PC apresentou 53% mais água armazenada em comparação ao PD.

Quando se compara a armazenagem de água no solo em superfície entre os sistemas de manejo, o potencial mátrico sob PD em períodos de secagem do solo são menos negativos que no PC, indicando que o solo sob PD deve aumentar a disponibilidade de água às plantas com menor energia de retenção em comparação ao PC (DALMAGO et al., 2009; MARTORANO et al., 2009). Esses indicadores reforçam a importância da análise integrada de respostas das culturas em um enfoque sistêmico de manejo de solo e água (MARTORANO et al., 2009).

Tabela 16. Efeito simples da cobertura do solo nas médias da drenagem interna (D), variação de armazenagem da água no solo (Δh) e da evapotranspiração (ET_r) das plantas de cobertura.

Cobertura	D (mm)	Δh (mm)	ET_r (mm)
Gramínea	-8,60 ab	17,60 a	-149,91 a
Leguminosa	-5,79 b	9,46 b	-152,60 a
Pousio	-14,05 a	22,16 a	-126,23 b

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade.

Para o efeito simples de preparo do solo, foi observado que o solo sob o PD apresentou maior evapotranspiração em relação ao PD. No entanto, o maior consumo de água não correlacionou, necessariamente à maior produção de massa seca das plantas de cobertura (Figura 25).

Tabela 17. Efeito simples do preparo do solo nas médias da evapotranspiração (ET_r) das plantas de cobertura.

Preparo	ET_r (mm)
PC	-152,29 b
PD	-160,74 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade.

4.4.2 Cultura do feijão

Para o ciclo da cultura do feijão, safra 2018/2019, observou-se um total de 577,7 mm de precipitação pluvial, da semeadura à colheita, com 58 % do total de precipitação do estágio V0 ao estágio V4 (vegetativo) e os 42 % restantes do estágio R5 ao estágio R9 (reprodutivo). De acordo com o ciclo de 88 dias da variedade de feijão do estudo, a cultura requer de 300,0 a 500,0 mm de água, dependendo do clima. No entanto, pequenos períodos de seca podem afetar severamente o rendimento do feijoeiro dependendo da etapa fenológica em que o déficit de água acontece (CALVACHE et al., 1997).

Quando as plantas de feijão estavam em estágio inicial de desenvolvimento (estágio V1 – emergência dos cotilédones, para o estágio V2 - quando o par de folhas primárias se encontravam expandidas), ocorreram dois eventos pluviométricos que corresponderam a 26% da precipitação do estágio vegetativo. Isto limitou o desenvolvimento das raízes, favoreceu a incidência de doenças radiculares e reduziu a sobrevivência das plântulas, uma vez que o feijão é sensível ao excesso de água e a má aeração do solo, possui reduzida capacidade de recuperação e sistema radicular pouco desenvolvido (BACK, 2001). Jadoski et al. (2003) trabalharam com a cultura do feijão e constataram que, quando submetida ao excesso de água, pode ter seu rendimento reduzido em até 50%.

Os resultados do teste F e o coeficiente de variação para os componentes de rendimento da cultura do feijão encontram-se no Apêndice I. Apesar de não ter ocorrido efeito significativo da interação preparo x cobertura no número de plantas e no número de vagens de feijão entre os tratamentos experimentais (Figura 27), observações de campo identificaram que o estresse hídrico causado por excesso de água no início de desenvolvimento da cultura reduziu o estande de plantas, e consequentemente o número de vagens, principalmente no Pousio-PC e Pousio-PD devido a *Macrophomina phaseolina* (doença causada por fungo). No PC-Gramínea e PC-Leguminosa também foi observado o sintoma da doença.

Figura 27. (A): Médias do número de plantas de feijão nos tratamentos experimentais. **(B):** Valores médios do número de vagens de feijão nos tratamentos experimentais. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Embora o efeito da interação preparo $\times$ cobertura não tenha sido observado, os efeitos citados no número de vagens de feijão foram confirmados pelo efeito simples de preparo e cobertura do solo. O solo sob PC apresentou 17% menos vagens em relação ao solo sob PD e as coberturas de gramínea e leguminosa produziram 25% mais vagens em relação à área sob pousio (Tabela 18).

Tabela 18. Efeitos simples do preparo e da cobertura do solo nas médias do número de vagens de feijão.

Preparo	Nº de vagens feijão (ha)	Cobertura	Nº de vagens feijão (ha)
PC	44650,11 b	Gramínea	53395,17 a
PD	53489,89 a	Leguminosa	53333,33 a
		Pousio	40481,50 b

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade.

Além disso, do estágio V3 ao estágio V4 (terceira folha trifoliada aberta), durante 18 dias, as precipitações registradas não foram suficientes para atender às necessidades hídricas da cultura do feijão. Back (2001) destaca que os efeitos prejudiciais à planta pela deficiência de água por períodos de 14, 17 e 20 dias podem ser observados pela redução do rendimento em

20, 38 e 52%, respectivamente. Por isso, por meio do conhecimento das características edafoclimáticas da região de cultivo e das respostas de uma determinada espécie em função dos parâmetros que atuam no seu desenvolvimento, é possível impedir ou amenizar que períodos de déficit hídrico afetem o rendimento final das culturas (VIEIRA, 1984).

Outros autores também encontraram uma redução significativa nos componentes de rendimento do feijão quando submetido a déficit hídrico (ACOSTA-GALLEGOS; SHIBATA, 1989). No entanto, esta redução foi maior (42 a 50%) quando o estresse foi aplicado na fase reprodutiva comparada à vegetativa, tendo isso sido atribuído a um decréscimo da área foliar e do número de vagens por planta. Já Peña-Cabriaes e Castellanos (1993) encontraram que a produção não foi afetada quando essa cultura foi submetida a estresse de água durante o estágio vegetativo; porém, foi reduzida em 50% quando submetida a estresse no período reprodutivo.

Não foi verificada diferença de produtividade entre os tratamentos experimentais (Figura 28), mas as maiores médias foram 2,11 Mg ha⁻¹ (PD-Gramínea) seguida de 2,10 Mg ha⁻¹ (PC-Leguminosa) e de 1,83 Mg ha⁻¹ (PD-Leguminosa), valores estes 20% inferiores às safras de 2017/2018 e 2018/2019 do feijão de primeira safra na região sudeste (CONAB, 2019).

Assim como observado por Carvalho et al. (2004), as áreas que permaneceram em pousio na entressafra proporcionaram menor produtividade de grãos quando comparada à da área cultivada com plantas de cobertura. Os mesmos autores identificaram que sob preparo convencional a produtividade da soja cultivada em sucessão à uma leguminosa foi maior do que quando cultivado em sucessão a uma gramínea.

Embora o efeito estatístico não pôde ser observado, no presente estudo tal ocorrência apresentou o mesmo padrão, possivelmente foi devido ao fato de a leguminosa ter gerado ambiente mais favorável à nodulação da cultura principal, proporcionando maior produtividade de grãos. Por outro lado, outros autores não verificaram efeito significativo na produção de grãos de feijão em preparo convencional e plantio direto em sucessão à uma leguminosa e uma gramínea (ARF et al., 1996; CARVALHO, 2000).

Figura 28. Médias de produtividade da cultura do feijão nos tratamentos experimentais. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A causa da baixa produtividade do feijão obtida no presente estudo deve ter sido as oscilações na disponibilidade hídrica no solo que, inicialmente, reduziram o estande de plantas nos tratamentos experimentais e, posteriormente, limitaram o desenvolvimento vegetativo da cultura e o enchimento de grãos. Além disso, houve grande infestação de plantas daninhas durante o desenvolvimento da cultura, principalmente de buva (*Conyza banariensis*), que cresceu em competição com as plantas de feijão, sendo necessário o controle (capina manual) para evitar maiores perdas de produtividade.

O baixo rendimento da cultura do feijão tem sido atribuído por alguns autores à cultivares pouco produtivas, incidência de pragas e doenças e, principalmente, devido às diferentes condições edafoclimáticas nas quais o feijão é cultivado, sendo que entre os fatores climáticos, a baixa disponibilidade de água no solo é o fator mais limitante na produção do feijão, especialmente em estágios críticos como a germinação, florescimento e enchimento de grãos (SORATTO et al., 2003; GUIMARÃES et al., 2006; RAMALHO et al., 2009), acarretando em baixos rendimentos (OLIVEIRA et al., 2005).

Segundo o IBGE (2019), no Brasil, apesar da qualidade tecnológica empregada, não se observam ganhos substanciais na produtividade média de feijão, estando estagnada em torno de 0,60 Mg ha⁻¹ nos últimos 30 anos. Esse valor pode ser considerado baixo se comparado ao rendimento de 1,80 Mg ha⁻¹ ou superior, que pode ser obtido com uso da irrigação tecnicamente conduzida (OLIVEIRA et al., 2005).

No caso da cultura do feijão, o período de avaliação do balanço de água (12/01/2019 a 21/03/2019) foi dividido em quatro sub-períodos, como mostrado na tabela 8. As densidades de fluxo de água à profundidade de 0,80 m alcançaram valores máximos de 0,96, 0,48 e 0,43

mm dia⁻¹, nos tratamentos PC-Pousio, PD-Gramínea e PC-Pousio, respectivamente, que se traduziram em drenagem interna (Figura 29).

Figura 29. Densidade de fluxo média da água no solo na profundidade de 0,80 m e precipitação durante o período de desenvolvimento da cultura do feijão nos tratamentos experimentais.

As médias da drenagem interna/ascensão capilar (D/AC), variação da armazenagem de água no solo (Δh) e evapotranspiração real (ET_r), por sub-período integrado para a cultura do feijão encontram-se na tabela 19.

Nota-se que para todos os períodos integrados houve somente drenagem interna, e que os maiores valores foram observados no PC-Pousio nos períodos 1, 2 e 3, e no PC-Gramínea no período 4. Estes valores constituem-se em até 59% e 2% da evapotranspiração por período integrado e do balanço de água total, respectivamente. Pesquisas desenvolvidas por Vachaud et al. (1973) já mostraram que a drenagem interna pode se constituir em até 30% do balanço de água total. Outros autores encontraram drenagem interna de 138,8 mm em 48 dias na cultura do feijão cultivado em solo muito argiloso (REICHARDT et al., 1974); 10,0 mm em Latossolo Vermelho que representou 3% da evapotranspiração (SILVEIRA; STONE, 1979); 83,0 mm na época chuvosa, representando 31% da evapotranspiração em solo franco-arenoso (CALVACHE; GARCIA, 1987); e até valores de drenagem interna desprezíveis (< 2%) quando se fez correto manejo da água de irrigação (CALVACHE; REICHARDT, 1996).

Tabela 19. Média da drenagem interna/ascensão capilar (D/AC), variação da armazenagem de água no solo (Δh) e evapotranspiração real (ET_r) por sub-período integrado (1, 2, 3 e 4) para o ciclo da cultura do feijão nos tratamentos experimentais. Os valores de precipitação pluvial (P) nos períodos 1, 2, 3 e 4 foram 83,3 mm, 54,5 mm, 199,9 mm e 43,2 mm, respectivamente.

Tratamento	1	2	3	4
D/AC (mm)				
PC-Gramínea	-0,6362	-0,0248	-1,0381	-1,0319
PC-Leguminosa	-0,5736	-0,0291	-0,0280	-0,4334
PC-Pousio	-2,2049	-0,8300	-5,5679	-0,0714
PD-Gramínea	-1,3283	-0,2157	-2,5993	-0,3327
PD-Leguminosa	-1,0649	-0,2117	-1,8791	-0,1560
PD-Pousio	-1,2314	-0,3581	-2,6708	-0,4190
Δh (mm)				
PC-Gramínea	10,63	-42,46	43,69	-38,95
PC-Leguminosa	4,14	-50,01	63,73	-31,67
PC-Pousio	8,88	-62,81	64,62	-37,06
PD-Gramínea	-14,15	-32,25	51,99	-52,71
PD-Leguminosa	10,21	-43,94	38,20	-41,73
PD-Pousio	8,32	-45,71	40,59	-31,80
ET_r (mm)				
PC-Gramínea	-72,03	-96,93	-155,17	-81,11
PC-Leguminosa	-78,58	-104,28	-134,14	-74,44
PC-Pousio	-72,22	-115,48	-129,72	-79,49
PD-Gramínea	-96,13	-86,53	-145,31	-95,58
PD-Leguminosa	-72,03	-98,23	-159,82	-84,77
PD-Pousio	-73,75	-99,26	-156,64	-74,58

Quanto às variações de armazenagem de água no solo, observou-se que este componente apresentou uma oscilação de -62,81 a +64,62 mm, o que mostra que, em alguns períodos, ocorreu maior saída de água, isto é, seu consumo pela cultura foi superior ao valor de entrada via precipitação, como nos períodos 2 e 4 em especial.

Para os diferentes estágios de desenvolvimento da cultura do feijão, foi observado que o consumo de água dos tratamentos experimentais foi em média de 5,70 mm dia⁻¹ durante a fase de desenvolvimento vegetativo até o pré-florescimento (V3 a R5); 6,99 mm dia⁻¹, durante os estágios de florescimento até a frutificação (R6 a R7) e de 4,80 mm dia⁻¹ da granação à maturação dos grãos (R8 a R9).

Os valores de consumo de água encontrados no presente estudo foram superiores aos observados por outros autores: 3,68 mm dia⁻¹ do início da fase vegetativa ao pré-florescimento (REICHARDT et al., 1974); 3,20 mm dia⁻¹ para o período de germinação à floração, 3,20 mm dia⁻¹ para o período da floração e de 1,70 mm dia⁻¹ para o período de desenvolvimento das vagens até a maturação (SILVEIRA; STONE, 1979); 2,20 mm dia⁻¹ na fase vegetativa, a valores

máximos de 4,60 mm dia⁻¹ na fase de floração e formação de vagens, 4,48 mm dia⁻¹ na fase de enchimento de vagens e 3,63 mm dia⁻¹ na fase de início da maturidade (CALVACHE et al., 1998).

Após os períodos de maior acúmulo de precipitação e maior armazenagem da água no solo, ocorreram as maiores evapotranspirações devido, provavelmente, à maior evaporação da água das camadas superficiais do solo e maior transpiração (CALVACHE et al., 1998).

Este efeito é amenizado com o uso dos tratamentos sob plantas de cobertura, sugerindo que elas reduzem a evaporação por um período de apenas alguns dias após um evento pluviométrico. Resultados semelhantes foram observados em climas sub-úmidos por Ward et al. (2012), que discutem que embora os agricultores relataram melhores condições de conteúdo de água no solo para o crescimento inicial de culturas com o solo protegido por plantas de cobertura, mais pesquisas são necessárias para confirmar o papel da palhada na redução da evaporação da superfície do solo.

Os resultados do teste F e o coeficiente de variação para os valores totais da drenagem interna/ascensão capilar (D/AC), variação da armazenagem de água no solo (Δh) e evapotranspiração real (ET_r) da cultura do feijão encontram-se no Apêndice H e as médias estão apresentados na tabela 20.

Tabela 20. Média dos valores totais da drenagem interna (D), variação de armazenagem (Δh) da água no solo e evapotranspiração (ET_r) da cultura do feijão nos tratamentos experimentais, no período de 12/01/2019 a 21/03/2019. A precipitação pluvial (P) neste período foi de 380,9 mm.

Tratamento	D/AC (mm)	Δh (mm)	ET _r (mm)
PC-Gramínea	-2,7310	-27,08	-405,25
PC-Leguminosa	-3,2641	-13,81	-391,44
PC-Pousio	-9,3741	-25,38	-396,91
PD-Gramínea	-4,4760	-47,12	-423,54
PD-Leguminosa	-3,3117	-37,27	-414,85
PD-Pousio	-4,6793	-28,61	-404,83

O valor médio de evapotranspiração da cultura do feijão com ou sem a utilização de plantas de cobertura foi de 406,14 mm. Silveira e Stone (1979), realizando o balanço hídrico no campo da cultura do feijão, determinaram que o consumo total de água pela cultura foi de 220,50 mm; Encarnação (1980) verificou que o consumo total durante todo o ciclo foi de 284,00 mm e Calvache et al. (1998) observaram valores de 448,00 mm. A variação de armazenagem da água no solo, no intervalo do ciclo da cultura foi negativa, isto é, o solo perdeu água.

Deduz-se, portanto, que a intensidade da evapotranspiração, além de depender de fatores fenológicos da planta, depende também das condições climáticas e suas flutuações

(CALVACHE et al., 1998) pois, como verificado no presente estudo, as variações climáticas estacionais, principalmente as relacionadas com a distribuição das chuvas ocasionaram interrupção da fase vegetativa do feijoeiro, o que levou à queda do estande de plantas.

Examinando a influência de plantas de cobertura na drenagem interna e evapotranspiração de culturas em sucessão em clima mediterrâneo, Ward et al. (2012) não identificaram grandes impactos no balanço de água, mas concluíram que o uso de plantas de cobertura melhora a sustentabilidade geral do sistema agrícola.

Considerando o somatório das densidades de fluxo ocorridas em todos os períodos avaliados para a cultura do feijão, nota-se que os maiores valores de drenagem interna ocorreram também no PC-Pousio > PD-Pousio > PD-Gramínea, assim como observado no ciclo das plantas de cobertura.

Estes resultados são confirmados pela interação significativa de preparo $\times$ cobertura na drenagem interna, em que se observa que o PD-Pousio apresentou maior drenagem interna em relação ao PC-Pousio, não havendo diferença entre o PD e o PC (com palha incorporada) quando se utiliza gramínea ou leguminosa. Avaliando o PD e o PC, separadamente, nota-se que não houve diferença na drenagem interna independente da utilização ou não de cobertura do solo no PD (PD-Gramínea = PD-Leguminosa = PD-Pousio), enquanto que no PC a drenagem interna foi: PD-Pousio > PD-Gramínea = PD-Leguminosa (Figura 30).

Figura 30. Médias da drenagem interna nos tratamentos experimentais no ciclo da cultura do feijão. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Trabalhando em sistema de produção agrícola subtropical, Yang et al. (2019) verificaram que o uso de plantas de cobertura reduziu em 36,00 mm a drenagem interna do solo e melhoraram os rendimentos anuais das culturas do milho e da soja, em grande parte devido à

diminuição da evaporação da água da superfície do solo. Os autores ressaltam que o uso a longo prazo de plantas de cobertura na rotação de culturas de verão é uma prática promissora para reduzir a drenagem interna e a evaporação da superfície do solo.

No entanto, Ward et al. (2012) verificaram que não ocorreram mudanças na drenagem além da zona radicular para as culturas cultivadas após as plantas de cobertura. Conforme mostrado por Ward et al. (2006), a drenagem durante a estação de crescimento está relacionada ao conteúdo de água no solo no início da estação, e, portanto, existe o risco de a drenagem aumentar se as culturas de cobertura reduzirem a evaporação na medida em que ocorrem as mudanças no conteúdo de água no solo.

A utilização de indicadores da eficiência do uso de água (EUA) é uma das formas de se analisar a resposta dos cultivos às diferentes condições de manejo do solo, pois relaciona a produção de grãos com a evapotranspiração da cultura (LIU; STUZEL, 2004; PUPPALA et al., 2005). Nesse contexto, as pesquisas devem ser direcionadas para alcançar altas produtividades e alta eficiência no uso da água (GAO et al., 2009; DETAR, 2009). Para esta medida não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos experimentais na cultura do feijão, indicando que a cobertura do solo não afetou a eficiência no uso da água pela cultura (Figura 31).

Figura 31. Médias da eficiência de uso da água da cultura do feijão nos tratamentos experimentais. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A EUA da cultura do feijão variou de 0,30 a 0,53 kg m⁻³, valores estes próximos aos observados em outros estudos que utilizaram diferentes lâminas de irrigação. Doorenbos e Kassam (1979b) estabeleceram, para a cultura do feijão, o valor da eficiência de uso da água da ordem de 0,30 a 0,60 kg m⁻³ quando utilizado lâminas de água de acordo com a necessidade da

cultura do feijão (300,0 a 500,0 mm). Brito et al. (2016) encontraram EUA de $0,50 \text{ kg m}^{-3}$ quando aplicados 376,4 mm de água durante todo o ciclo da cultura e EUA 10 vezes menor ($0,06 \text{ kg m}^{-3}$) quando se restringiu a aplicação de água durante o florescimento do feijão, indicando alta sensibilidade da cultura ao estresse hídrico nesta fase. Calvache et al. (1997) encontraram EUA de $0,46 \text{ kg m}^{-3}$ quando o estresse hídrico foi aplicado durante a fase de enchimento da vagem. Em geral, o EUA do feijão encontrada na literatura é baixa, e percebe-se certo aumento da EUA quando as perdas por evaporação da água no solo são minimizadas, tratando-se de uma época chuvosa (PASSIOURA, 1977).

4.2.3 Cultura do triticale

Nas regiões de cerrado, cujo clima é tropical sazonal de inverno seco, o rendimento das culturas comerciais, como o triticale, é muitas vezes imprevisível, dependendo da quantidade e época da precipitação na estação de crescimento. Geralmente, o rendimento desta cultura ou de qualquer outra cultura comercial de sequeiro está altamente conectado à precipitação reduzida e à probabilidade de ocorrência de geadas durante os meses de inverno. A seca resulta da falta contínua de precipitação e se manifesta quando a quantidade de precipitação em um local fica abaixo dos níveis usuais durante vários meses (GOCIC, 2014).

De acordo com o histórico de precipitação dos últimos 25 anos, o volume de chuva dos meses de abril a setembro, para a região onde se encontra a área experimental do presente estudo, é de 238,0 mm, sendo 64% desse valor distribuído nos meses de abril, maio e setembro. Para o ciclo da cultura do triticale, safra de inverno/2019, observou-se um total de 200,9 mm de precipitação pluvial, da semeadura à colheita. De acordo com as necessidades hídricas da cultura, uma faixa de 150,0 a 200,0 mm é considerada ideal para a cultura (FARIA; OLITTA, 1987). No entanto, 58% dos 200,9 mm de precipitação concentrou-se somente no mês de abril. Desta forma, o efeito mais forte da seca foi observado no período mais crítico da cultura, correspondente à fase reprodutiva nos meses de junho, julho e agosto, quando apenas 72,0 mm de chuva foram distribuídos.

Embora a precipitação não tenha sido distribuída de forma regular, a cultura do triticale atingiu produtividades próximas à da região Sudeste do Brasil nos anos de 2017 e 2018 ($2,77$ e $2,59 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente), segundo o levantamento da CONAB (2019).

Foi verificada diferença no número de plantas entre os tratamentos experimentais, em que PC-Gramínea e PC-Leguminosa apresentaram, aproximadamente, 18% menos plantas que PD-Gramínea e PD-Leguminosa, e o PC-Pousio apresentou maior número de plantas em relação ao PD-Pousio. No entanto, este componente de rendimento não afetou de forma

significativa a produtividade dos tratamentos experimentais, sendo as maiores produtividades observadas nas parcelas sob Pousio (2,79 Mg ha⁻¹ - PD-Pousio e 2,65 Mg ha⁻¹ - PC-Pousio) (Figura 32).

Figura 32. (A): Médias do número de plantas de tritcale nos tratamentos experimentais. (B): Valores médios da produtividade da cultura do tritcale nos tratamentos experimentais. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.

No período de avaliação do balanço de água no solo com a cultura do tritcale (02/05/2019 a 29/08/2019), não houve drenagem consistente além da zona radicular após cultivadas as plantas de cobertura e a safra de verão (feijão). A densidade de fluxo da água alcançou valores máximos de -0,05 mm dia⁻¹ (drenagem interna) no início do estabelecimento da cultura, quando ainda ocorreram eventos pluviométricos esporádicos e 0,04 mm dia⁻¹ (ascensão capilar) entre a fase vegetativa de elongação do colmo ao espigamento (Figura 33).

A tendência de drenagem interna observada nos ciclos de cultivo anteriores se repetiu, indicando a maior perda de água em tratamentos que não utilizaram plantas de cobertura (pousio) e que utilizaram espécie de graminea sobre a superfície do solo. A maior utilização de água em profundidade pela cultura do tritcale (ascensão capilar) ocorreu no PC-Pousio, PC-Leguminosa e PD-Leguminosa.

Figura 33. Densidade de fluxo média da água no solo na profundidade de 0,80 m e precipitação durante o período de desenvolvimento da cultura do triticale nos tratamentos experimentais.

As médias da drenagem interna/ascensão capilar (D/AC), variação da armazenagem de água no solo (Δh) e evapotranspiração real (ET_r), por sub-período integrado para a cultura do triticale, encontram-se na tabela 21. Para esta cultura, o balanço de água no solo foi avaliado em sete sub-períodos do período total de desenvolvimento da cultura cujas datas de início e fim de cada um deles podem ser vistas na tabela 8.

Nos períodos 1, 5 e 7 ocorreu tanto drenagem interna quanto ascensão capilar nos tratamentos experimentais. Nos demais períodos, nota-se que a ascensão capilar, ainda que muito baixa, ocorreu na maior parte do tempo durante o ciclo da cultura, indicando secamento do solo devido a longos períodos sem chuva e utilização de água em profundidade pela cultura, fato este comprovado pelos valores negativos de variação de armazenagem da água no solo.

Quanto à evapotranspiração, percebe-se efeito oposto ao observado no ciclo do feijão, no qual foi demonstrado que a palhada sobre o solo proveniente de plantas de cobertura reduziu a evaporação da superfície do solo e aumentou a evapotranspiração da cultura, assim como observado em muitas outras regiões e zonas climáticas (FREEBAIRN et al., 1986, GREGORY et al., 2000, BOLLIGER et al., 2006, SALADO-NAVARRO; SINCLAIR 2009). No entanto, para a safra de inverno, a evapotranspiração real, bem como a produtividade do triticale, mostrou tendência de serem superiores nos tratamentos sem cobertura (pousio), provavelmente, porque a evaporação do solo diminuiu à medida que a evaporação potencial aumenta e as chuvas se tornam mais esporádicas, assim como discutido por Gregory et al. (2000).

Tabela 21. Média da drenagem interna/ascensão capilar (D/AC), variação da armazenagem de água no solo (Δh) e evapotranspiração real (ET_r) por sub-período integrado (1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7) para o ciclo da cultura

do tritcale nos tratamentos experimentais. Os valores de precipitação pluvial (P) nos períodos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 foram 19,6 mm, 26,5 mm, 0,0 mm, 0,0 mm, 60,8 mm, 0,0 mm e 8,4 mm, respectivamente.

Tratamento	1	2	3	4	5	6	7
D/AC (mm)							
PC-Gramínea	0,0088	0,0807	0,0246	0,0038	0,0073	0,0106	0,0197
PC-Leguminosa	-0,0110	0,4116	0,1642	0,0028	0,0027	0,0064	0,0132
PC-Pousio	-0,0015	0,5360	0,1982	0,0016	-0,0200	0,0072	0,0262
PD-Gramínea	-0,0559	0,1502	0,0340	0,0001	0,0362	0,0241	0,0026
PD-Leguminosa	0,0367	0,1958	0,1168	0,0046	0,0385	0,0519	-0,0043
PD-Pousio	-0,0463	0,1631	0,1120	0,0220	-0,0015	0,0059	0,0062
Δh (mm)							
PC-Gramínea	-34,71	18,10	-35,94	-3,28	35,11	-22,49	-30,37
PC-Leguminosa	-38,86	20,24	-32,19	-1,68	42,47	-28,03	-32,08
PC-Pousio	-35,71	11,74	-29,76	-8,24	29,90	-11,30	-37,16
PD-Gramínea	-31,57	4,98	-29,50	-2,06	33,02	-37,75	-12,84
PD-Leguminosa	-33,52	9,06	-26,05	-3,15	31,24	-27,98	-21,30
PD-Pousio	-48,30	18,96	-32,44	-3,01	38,45	-25,54	-28,58
ET_r							
PC-Gramínea	-54,32	-20,55	-35,96	-3,28	-27,70	-22,50	-38,79
PC-Leguminosa	-58,45	-20,17	-32,35	-1,68	-18,33	-28,04	-40,50
PC-Pousio	-55,31	-23,12	-29,96	-8,24	-30,88	-11,30	-45,58
PD-Gramínea	-51,12	-24,99	-29,54	-2,06	-27,82	-37,78	-21,24
PD-Leguminosa	-53,16	-23,67	-26,16	-3,16	-29,59	-28,03	-29,69
PD-Pousio	-67,85	-20,34	-32,55	-3,03	-22,35	-25,54	-36,99

Os resultados do teste F e o coeficiente de variação para os valores totais da drenagem interna/ascensão capilar (D/AC), variação da armazenagem de água no solo (Δh) e evapotranspiração real (ET_r) da cultura do tritcale encontram-se no Apêndice H e as médias estão apresentadas na tabela 22.

Nesta pesquisa, na maioria dos casos, os tratamentos com menor uso de água no ciclo de cultivo anterior (safra de verão do feijão) utilizaram mais água por ascensão capilar durante a safra da cultura do tritcale (PC-Leguminosa e PC-Pousio).

Tabela 22. Média dos valores totais da drenagem interna (D), variação de armazenagem (Δh) da água no solo e evapotranspiração (ET_r) da cultura do tritcale nos tratamentos experimentais. O valor da precipitação pluvial (P) no período foi de 115,3 mm.

Tratamento	D/AC (mm)	Δh (mm)	ET_r (mm)
PC-Gramínea	0,1556	-73,57	-189,02

PC-Leguminosa	0,5900	-70,13	-186,02
PC-Pousio	0,7478	-80,52	-196,57
PD-Gramínea	0,1913	-71,61	-187,11
PD-Leguminosa	0,4400	-71,69	-187,43
PD-Pousio	0,2613	-80,46	-196,02

Percebe-se que a densidade de fluxo traduziu-se em ascensão capilar durante o balanço de água no solo na cultura do tritcale. As menores ascensões capilares ocorreram nos tratamentos sob planta de cobertura gramínea, independentemente do tipo de preparo do solo, resultado este comprovado pelo efeito simples de cobertura do solo na densidade de fluxo (Tabela 23).

Tabela 23. Efeito simples da cobertura do solo nas médias da ascensão capilar (AC) para o ciclo da cultura do tritcale.

Cobertura	AC (mm)
Gramínea	0,1735 b
Leguminosa	0,5148 a
Pousio	0,5047 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade.

Ainda que não observada diferença para a ET_r entre os tratamentos, observa-se tendência de menores valores de ET_r nos tratamentos sob cobertura de leguminosa. Neste sentido, Huang et al. (2003) também relataram que o uso de leguminosas nas rotações de trigo no inverno diminuiu a ET do trigo e atribuíram isso à melhoria da fertilidade do solo devido à inclusão da biomassa fresca de leguminosas ao solo.

Em uma região semi-árida da China, Zhang et al. (2016) realizaram um experimento de campo para investigar o efeito da cobertura de leguminosa e uma área sem cobertura na eficiência do uso da água do trigo de inverno e no balanço de água no solo em diferentes anos de precipitação. Os autores observaram que o cultivo de leguminosas como plantas de cobertura pode ter efeitos positivos ou neutros na produtividade e na eficiência no uso da água da cultura em sucessão (trigo) quando as precipitações são adequadas.

Os mesmos autores concluíram que o uso de leguminosas é uma opção para manter o equilíbrio da água no solo, pois aumenta a quantidade de matéria orgânica do solo que provavelmente poderia aumentar a porosidade e a infiltração, e a capacidade de retenção de água do solo. No entanto, contrapondo os resultados obtidos no presente estudo, outros autores relataram que em anos mais secos houve uma forte influência negativa no balanço de água no

solo quando se utilizou planta de cobertura leguminosa (UNGER; VIGIL, 1998; WARD et al., 2012).

Desta forma, KRSTIC et al. (2018) afirma que a contribuição de plantas de cobertura na rotação das culturas depende das espécies, do solo e das condições climáticas e ainda ressalta que todos os três efeitos devem ser analisados individualmente, mas também por meio de interações mútuas. Por isso, em épocas secas, é necessário conhecimento sobre o uso da água pelas plantas de cobertura em comparação com um solo descoberto para uma melhor estratégia de gerenciamento agrícola (BODNER et al., 2007).

Quanto à eficiência de uso da água pelos tratamentos experimentais, não foram observadas diferenças significativas (Figura 34), mas, como tendência, a média da EUA variou de 0,98 kg m⁻³ (PD-Pousio) a 1,61 kg m⁻³ (PD-Gramínea), sendo os maiores valores observados em PD-Leguminosa e PD-Gramínea. Em termos de tendência, o aumento da evapotranspiração diminuiu a EUA, assim como observado por Aggarwal et al. (1986) em estudo da performance de cultivares de tritcale em condições de sequeiro.

Figura 34. Valores médios da eficiência de uso da água da cultura do tritcale nos tratamentos experimentais.

Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Em região semi-árida da China Zhang et al. (2013) encontraram valores da EUA próximos ao do presente estudo (0,93 a 1,47 kg m⁻³) para a cultura do trigo. No entanto, contradizendo os resultados encontrados no presente estudo, os autores notaram efeito negativo na EUA do plantio direto em relação a prática convencional.

Com relação ao uso de plantas de cobertura em sucessão ao cultivo de trigo, Zhang et al. (2016) notaram efeito significativo do uso de leguminosas no rendimento de grãos e na EUA da cultura do trigo com relação ao solo descoberto, efeito este observado somente na EUA do

PD-Leguminosa do presente estudo. Já Nielsen e Vigil (2014) observaram que o uso de leguminosa cultivada em sucessão ao trigo não melhorou a produção e o EUA da cultura em comparação com o trigo precedido por gramínea ou pousio.

Notavelmente, não existe um consenso real sobre os efeitos do manejo do solo e o uso de plantas de cobertura nos processos do balanço de água no solo e no rendimento de culturas comerciais, evidenciando a importância de quantificar o impacto e intensidade desses fenômenos nos diferentes sistemas produtivos e regiões climáticas.

5. CONCLUSÕES

Os resíduos culturais da espécie de leguminosa sobre a superfície do solo no PD promoveu menor densidade do solo e menor resistência do solo à penetração das raízes e maior porosidade total e macroporosidade, indicando melhorias das propriedades físicas do solo em relação à sua incorporação no PC.

Na cultura de verão (feijão), a maior perda de água por drenagem interna ocorreu no PC-Pousio e a manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo não significou aumento de evapotranspiração e de produtividade da cultura.

A menor utilização de água em profundidade pela cultura do triticle (ascensão capilar) ocorreu nos tratamentos que utilizaram planta de cobertura gramínea. Maior evapotranspiração e maior produtividade em termos médios, foram encontradas em PC-Pousio e PD-Pousio, indicando que o déficit hídrico da estação modifica o balanço de água no solo de culturas de inverno.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As variações climáticas e a extrema variação na distribuição da precipitação durante os anos em várias regiões do Brasil e do mundo trouxeram e produzirão muitos desafios na produção de culturas comerciais, pois levantam a questão de incluir plantas de cobertura nas rotações de culturas. Além disso, é de questionar se os benefícios das plantas de cobertura podem ocorrer nas diferentes épocas do ano, possibilitando duas safras anuais (de verão e de inverno).

A utilização de plantas de cobertura tem inúmeros efeitos positivos, a curto e a longo prazos. A disponibilidade de água no solo, adição de nitrogênio pelas leguminosas e redução da erosão são alguns dos efeitos a curto prazo, que variam significativamente e são fortemente dependentes do suprimento de água. No entanto, a melhoria de propriedades do solo, como a infiltração da água, estrutura e conteúdo de matéria orgânica adicionada por resíduos radiculares ou incorporação de biomassa de plantas de cobertura, requer vários anos, e leva a melhores condições do solo para superar variações de temperatura e precipitação.

Devido ao alto potencial de ET_r e à baixa pluviosidade nos meses de inverno, as culturas de cobertura não foram associadas a uma maior retenção de água no solo nem a valores consistentes de drenagem interna durante este período.

Houve alguma evidência, a partir da densidade de fluxo, que a utilização de leguminosas como plantas de cobertura é mais eficiente para redução de perdas de água por evaporação e drenagem interna de culturas cultivadas em sucessão no verão, mas mais pesquisas serão necessárias para confirmar isso. Não obstante o potencial da drenagem interna na recarga das águas subterrâneas, os resultados mostraram que houve uma redução desta drenagem devido ao aumento da evapotranspiração. No entanto, quando a rotação de culturas incluiu o manejo de plantas de cobertura sobre a superfície do solo antes da cultura de inverno, o uso destas plantas pôde ser questionado.

Não há, portanto, um consenso real sobre a intensidade da drenagem interna em diferentes regiões climáticas, o que destaca a importância de estimar o balanço de água no solo com plantas de cobertura em comparação com o solo descoberto, para avaliar a disponibilidade de água para a demanda da próxima safra comercial.

Além do consumo médio de água pelas culturas com a finalidade de caracterizar o potencial produtivo de determinadas regiões, em função das condições de precipitação e disponibilidade de água, a determinação de outros processos envolvidos no balanço de água no solo, notadamente a densidade de fluxo, frente a períodos de excesso ou escassez de água é de

grande importância, pois por meio deste estudo podem-se selecionar variedades e também épocas de plantio de acordo com as características da região, procurando minimizar os custos de produção.

Desta forma, são necessários esforços futuros para encontrar o gerenciamento de campo apropriado para avaliar os efeitos da utilização de plantas de cobertura, principalmente em estações secas. Espera-se que as descobertas do presente estudo possam servir para aprimoramento de estratégias de gerenciamento de campo que visem a otimização da produtividade agrícola a sustentabilidade ambiental e a lucratividade econômica.

REFERÊNCIAS

- ABAZI, U.; LORITE, I.J.; CÁRCELES, B. MARTÍNEZ-RAYA, A.; DURÁN, V.H.; FRANCIA, J.R.; GÓMEZ, J.A. WABOL: A conceptual water balance model for analyzing rainfall water use in olive orchards under different soil and cover crop management strategies. **Computers and Electronics in Agriculture**, 91:35–48, 2013.
- ACOSTA-GALLEGOS, J.A.; SHIBATA, J.K. Effects of water stress on growth and yield of indeterminate dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. **Field Crop Research**, 20:81-93, 1989.
- ADL, S.M.; COLEMAN, D.C.; READ, F. Slow recovery of soil biodiversity in sandy loam soils of Georgia after 25 years of no-tillage management. **Agriculture Ecosystems and Environment**, 114:323-334, 2005.
- AGGARWAL, P.K.; SINGH, A.K.; CHATURVEDI, G.S.; SINHA S.K. Performance of wheat and triticale cultivars in a variable soil – water environment. II. Evapotranspiration, water use efficiency, harvest index and grain field. **Fields Crops Research**, 13:301-315, 1986.
- AGUIAR, A.T.E.; GONÇALVES, C.; PATERNIANI, M.E.A.G.Z.; TUCCI, M.L.S.; CASTRO, C.E.F. **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas**. 7. (ed) rev. e atual. Campinas: Instituto Agrônomo, 2014. 452p. (Boletim IAC, nº 200).
- AITA, C.; BASSO, C.J.; CERETTA, C.A.; GONÇALVES, C.N.; DA ROS, C.O. Plantas de cobertura de solo como fonte de nitrogênio ao milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 25:157-165, 2001.
- AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Decomposição e liberação de nitrogênio dos resíduos culturais de plantas de cobertura de solo solteiras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27:601-612, 2003.
- AITA, G.; GIACOMINI, S.J.; HÜBNER, A.P.; CHIAPINOTTO, I.C.; FRIES, M.R. Consorciação de plantas de cobertura antecedendo o milho em plantio direto. I - Dinâmica do nitrogênio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:739-749, 2004.
- ALCANTARA, C.; PUJADAS, A.; SAAVEDRA, M. Management of cruciferous cover crops by mowing for soil and water conservation in southern Spain. **Agricultural Water Management**, 98:1071–1080, 2011.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO; 1998. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALONSO-AYUSO, M.; GABRIEL, J.L.; QUEMADA, M. The kill date as a management tool for cover cropping success. **Plos One**, 9:e109587, 2014.
- ALVARENGA, R.C.; CABEZAS, W.A.L.; CRUZ, J.C.; SANTANA, D.P. Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. **Informe Agropecuário**, 22:25-36. 2001.
- ALVARENGA, R.M.; COSTA, L.M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A.J. Características de alguns adubos verdes de interesse para a conservação e recuperação de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 30:175-185, 1995.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22:711-728, 2013.
- AMADO, T.J.C.; ALMEIDA, E.X.; DALLAGNOL, L.; MATOS, A.T. **Determinação da cobertura do solo por adubos verdes**. Florianópolis:EMPASC, 1987. 6p. (Pesquisa em Andamento, 78).
- AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26:241-248, 2002.
- ANDRADE, R.S.; STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. Culturas de cobertura e qualidade física de um Latossolo em plantio direto. **Revista de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 13:411-418, 2009.

ANDREOTTI, M.; ARALDI, M.; GUIMARÃES, V.F.; FURLANI JUNIOR, E.; BUZETTI, S. Produtividade do milho safrinha e modificações químicas de um latossolo em sistema plantio direto em função de espécies de cobertura após calagem superficial. **Acta Scientiarum Agronomy**, 30:209-115, 2008.

ANDRIOLI, I.; PRADO, R.M. Plantas de cobertura em pré-safra e adubação nitrogenada na fertilidade do solo em diferentes camadas, cultivado com milho em sistema de plantio direto e convencional. **Semina**, 33:963-978, 2012.

ARF, O.; SÁ, M. E.; OKITA, C. S.; TIBA, M. A.; GUERREIRO NETO, G.; OGASSAWARA, F. Y. Efeito de diferentes espaçamentos e densidades de semeadura sobre o desenvolvimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, 31:533-597, 1996.

ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F.; FLECK, N.G.; BORTOLINI, C.G.; NEVES, R.; AGOSTINETTO, D. Efeitos do manejo mecânico e químico da aveia preta no milho em sucessão e no controle do capim-papuã. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 36:851-860, 2001.

ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; WILDNER, L.P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29:425-435, 2005.

ARSHAD, M.A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. **Physical tests for monitoring soil quality**. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., eds. Methods for assessing soil quality. Madison, Soil Science Society of America. 1996. p.123-141 (SSSA Special publication, 49).

AZOOZ, J.H.; ARSHAD, M.A. Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage systems. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, 76:143-152, 1996.

BA, L.T.; VAN, K.L.; VAN ELSACKER, S.; CORNELIS, W.M. Effect of cropping system on physical properties of clay soil under intensive rice cultivation. **Land Degradation and Development**, 27:973-982, 2014.

BABUJIA, L.C.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J.C.; BROOKES, P.C. Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. **Soil Biology and Biochemistry**, 42:2174-2181, 2010.

BACK, A. J. Necessidade de irrigação da cultura de feijão no sul do estado de Santa Catarina. **Revista Tecnologia e Ambiente**, 7:35-44, 2001.

BARCELOS, A.A.; CASSOL, E.A.; DENARDIN, J. E. Infiltração de água em um latossolo vermelho-escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23:35-43, 1999.

BARTLETT, M.S. **Properties of sufficiency and statistical tests**. Proceedings of the Royal Society, Series A, 1937.

BASCHE, A.; DE LONGE, M. The impact of continuous living cover on soil hydrologic properties: a meta-analysis. **Soil Science Society of American Journal**, 81:1179-1190, 2017.

BASCHE, A.; KASPAR, T.C.; ARCHONTOULIS, S.V.; JAYNES, D.B.; SAUER, T.J.; PARKIN, T.B.; MIGUEZ, F.E. Soil water improvements with the long-term use of a winter rye cover crop. **Agriculture Water Management**, 172:40-50, 2016a.

BASCHE, A.; ARCHONTOULIS, S.V.; KASPAR, T.C.; JAYNES, D.B.; PARKIN, T.B.; MIGUEZ, F.E. Simulating long-term impacts of cover crops and climate change on crop production and environmental outcomes in the Midwestern United States. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 218:95-106, 2016b.

BASSO, C.J.; REINERT, D.J. Variação da agregação induzida por plantas de cobertura de solo no inverno e plantio direto de milho em um LatossoloPodzólico. **Ciência Rural**, 28:567-571, 1998.

BAUMHARDT, R.L.; KEELING J.W.; WENDT, C.W. Tillage and residue effects on infiltration into soils cropped to cotton. **Agronomy Journal**, 85:379-383, 1993.

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 and Tillage Research**, 68:71-82, 2002.

BAYER, C.; MARTI-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 39:677-683, 2004.

BELTRAME, L.F.C.; GONDIM, L.A.P.; TAYLOR, F.C. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 5:145-149, 1981.

BERTIN, G.E.; ANDRIOLLI, T.; CENTURION, J.F. Plantas de cobertura em pré-safra ao milho em plantio direto. **Acta Scientiarum Agronomy**, 27:379-386, 2005.

BERTOL, E.; CIPRANDI, O.; KURTZ, C.; BAPTISTA, A.S. Persistência de resíduos culturais de aveia e milho sobre a superfície do solo em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 22:705-712, 1998.

BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.C.; PEREIRA FILHO, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho Distrófico típicosob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 25:167-177, 2001.

BLANCO-CANQUI, H. SHAVER, T.M.; LINDQUIST, J.L.; SHAPIRO, C.A.; ELMORE, R.W.; FRANCIS, C.A.; HERGERT, G.W. Cover crops and ecosystem services: insights from studies in temperate soils. **Agronomy Journal**, 107:2449-2474, 2015.

BODNER, G.; LOISKANDL, W.; KAUL, H.P. Cover crop evapotranspiration under semi-arid conditions using FAO dual crop coefficient method with water stress compensation. **Agricultural Water Management**, 93:95-98, 2007.

BOER, C.A.; ASSIS, R.L.; SILVA, G.P.; BRAZ, A.J.B.P.; BARROSO, A.L.L.; CARGNELUTTI FILHO, A.; PIRES, F.R. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura na entressafra em um solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 42:1269-1276, 2007.

BOLLIGER, A.; MAGID, J.; AMADO, J.C.T.; SKORA NETO, F.; RIBEIRO, M.F.S.; CALEGARI, A.; RALISCH, R.; NEERGAARD, A. Taking stock of the Brazilian zero-till-revolution: a review of landmark research and farmers' practice. **Advances in Agronomy**, 91:47-110, 2006.

BRITO, J.E.D.; ALMEIDA, A.C.S.; LYRA, G.B.; FERREIRA JUNIOR, R.A.; TEODORO, I.; SOUZA, J.L. Produtividade e eficiência de uso da água em cultivo de feijão sob diferentes coberturas do solo submetido à restrição hídrica. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, 10:565-575, 2016.

BRITO, A.S.; LIBARDI, P.L.; GHIBERTO, P.J. Componentes do balanço de água no solo com cana-de-açúcar, com e sem adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 33:295-303, 2009.

BULISANI, E.A.; ROSTON, A. J. **Leguminosas: adubação verde e rotação de culturas**. Documentos IAC, Campinas, 35:13-16, 1993.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, 3:519-524, 1990.

CALEGARI, A. Alternativa de rotação de culturas para plantio direto. **Revista Plantio Direto**, 80:62-70, 2004.
CALVACHE A.M.; REICHARDT, K.; MALAVOLTA, E.; BACCHI, O.O.S. Efeito da deficiência hídrica e da adubação nitrogenada na produtividade e na eficiência do uso de água em uma cultura do feijão. **Scientia Agricola**, 54:232-240, 1997.

CALVACHE A.M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S. Efeito de épocas de deficiência hídrica na evapotranspiração atual da cultura do feijão cv. Imbabello. **Scientia Agricola**, 55:485-497, 1998.

CALVACHE, M.; REICHARDT, K. **Water deficit imposed by partial irrigation at different growth stages for common bean (*Phaseolus vulgaris* L.)**. In: IAEA TECDOC 888, Nuclear techniques to assess irrigation schedules for field crop. 1996, p.63-72.

CAMARGO, O.A. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Campinas: Fundação Cargill, 1983. 44p.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2009. 77p. (Boletim técnico, 106).

CAMARGO, R.; PIZZA, R. J. Produção de biomassa de plantas de cobertura e efeitos na cultura do milho sob sistema plantio direto no município de Passos, MG. **Bioscience Journal**, 23:76-80, 2007.

CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLLODI, R.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 19:121-126, 1995.

CAMPOS, I.; BALBOTÍN, C.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J.; GONZÁLEZ-DUGO, M.P.; NEALE, C.M.U.; CALERA, A. Combining a water balance model with evapotranspiration measurements to estimate total available soil water in irrigated and drained vineyards. **Agricultural Water Management**, 165:141-152, 2016.

CARVALHO, A.M.; SODRÉ FILHO, J. **Uso de adubos verdes como cobertura do solo**. Planaltina: Embrapa-CPAC, 2000. 20p. (Boletim de Pesquisa, 11).

CARVALHO, M.A.C.; ATHAYDE, M.L.F.; SORATTO, R.P.; ALVES, C.M.; ARF, O. Soja em sucessão a adubos verdes no sistema de plantio direto e convencional em solo de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 39:1141-1148, 2004.

CASTRO, L.G.; LIBARDI, P.L.; Jong van LIER, Q. **Soil water dynamics in a Brazilian infiltration terrace under different management practices**. In: PAGLIAI, M.; JONES, R., orgs. Sustainable land management. Environmental protection: A soil physical approach. Reiskirchen, ISSDS, 2002. v.35. p.191-198. (Advances in GeoEcology, 35).

CASTRO, O.M. Comportamento físico e químico de um Latossolo Roxo em função do seu preparo na cultura do milho (*Zea mays* L.). 1995. 174 f. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

CAVALIERI, K.M.V. SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; LEÃO, T.P.; DEXTER, A.R.; HAKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physic properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná Brazil. **Soil Tillage and Research**, 103:158-164, 2009.

ÇERÇIOĞLU, M.; STEPHEN, H.A.; RANJITH, P.U.; SALAH A. Effect of cover crop management on soil hydraulic properties. **Geoderma**, 343:247-253, 2019.

CERETTA, C.A.; BASSO, C.J.; FLECHA, A.M.T.; PAVINATO, P.S.; VIEIRA, F.C.B.; MAI, M.E.M. Manejo da adubação nitrogenada na sucessão aveia preta/milho, no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26:163-171, 2002.

CHATTERJEE, A. North-central US: introducing cover crops in the rotation. **Crops Soils**, 46:14-15, 2013.

CHAVES, J.C.D.; CALEGARI, A. Adubação verde e rotação de culturas. **Informe Agropecuário**, 22:53-60, 2001.

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

CHILDS, E.C. Concepts of soil water phenomena. **Soil Science**, Baltimore, 113:246-253, 1971.

CIIAGRO – CENTRO INTEGRADO DE INFORMAÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS. Instituto Agrônomo de Campinas. Disponível em:

<<http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/Listagens/Resenha/LResenhaLocal.asp>> Acesso em: 15 set. 2019.

CINTRA, F.L.D.; LIBARDI, P.L.; SAAD, A.M. Balanço hídrico no solo para porta-enxertos de citros em ecossistema de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 4:23-28, 2000.

COLLA, G.; MITCHELL, J.; JOYCE, B.A.; Soil physical properties and tomato yield and quality in alternative cropping systems. **Agronomy Journal**, 92:924–932, 2000.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira: grãos, quarto levantamento. Monitoramento agrícola– safra2018/19. v.6 n.4 – Companhia Nacional de Abastecimento – Brasília: Conab, 2019. p.1-126.

CORREIA, N.M.; DURIGAN, J.C. Culturas de cobertura e sua influência na fertilidade do solo son sistema de plantio direto (SPD). **Bioscience Journal**, 24:20-31, 2008.

CORSINI, P.C.; FERRAUDO, A.S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 34:289-298, 1999.

COSTA, A.C.S. Balanço hídrico em culturas de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e de milho (*Zea mays* L.) sob condições de campo. 1986. 166 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

COSTA, E.A.; GOEDERT, W.; SOUSA, D.M.G. Qualidade de solo submetido a sistemas de cultivo com preparo convencional e plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 41:1185-1191, 2006.

COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27:527-535, 2003.

CRUSCIOL, C.A. C.; MORO, E.; LIMA, E.V.; ANDREOTTI, M. Taxas de decomposição e de liberação de macronutrientes da palhada de aveia preta em plantio direto. **Bragantia**, 67:481-489, 2008.

CRUZ, A.C.R.; LIBARDI, P.L.; ROCHA, G.C.; CARVALHO, L. A. Evapotranspiração real de uma cultura de laranja em produção num Latossolo Vermelho-amarelo **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29:659-668, 2005.

DAIGH, A.L.; HELMERS, M.J.; KLADIVKO, E.; ZHOU, X.; GOEKEN, R.; CAVDINI, J.; BARKER, D.; SAWYER, J. Soil water during the drought of 2012 as affected by rye cover crops in fields in iowa and indiana. **Journal Soil Water Conservation**. 69:564–573, 2014.

DAL FERRO, N.; SARTORI, L.; SIMONETTI, G.; BERTI, A.; MORARI, F. Soil macro- and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth. **Soil Tillage and Research**, 140:55-65, 2014.

DALMAGO, G.A.; BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J.I.; KRUGER, 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**, 13:855-864, 2009.

DALMAGO, G.A. Dinâmica da água no solo em cultivos de milho sob plantio direto e preparo convencional. 2004. 268f. Tese (Doutorado em Fitotecnia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Faculdade de Agronomia, Porto Alegre.

DERPSCH, T.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A.; HONGWEN, L. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits **Internaticonal Journal of Agricultural Biological Engineering**, 3:1-26, 2010.

DETAR, W.R. Crop coefficients and water use for cowpea in the San Joaquin Valley of California. **Agricultural Water Management**, 96:53-66, 2009.

DIAS JÚNIOR, M.S. **Compactação do solo**. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., H.V.; SCHAEFER, C.E.G.R., ed. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p.55-94.

DIETZEL, R. LIEBMAN, A.; EWING, R.; HELMERS, M.; HORTON, R.; JARCHOW, A.; ARCHONTOULIS, S. How efficiently do corn and soybean-based cropping systems use water? A systems modeling analysis. **Global Change Biology**, 22:666-681, 2016.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Effectos del agua sobre rendimento dell os cultivos**. Roma: FAO, 1979a. 212p. Estudio FAO: Riego y Drenaje, 33.

DOORENBOS, J.; KASSAN, A.H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979b. 193p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 33).

ELTZ, F.L.F.; PEIXOTO, R.T.G.; JASTER, F. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno Álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 13:259-267, 1989.

ENCARNAÇÃO, C.R.F. Estudo da demanda do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) var. Goiano Precoce. 1980. 62f. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo – “Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

ERNANI, P.R.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V. Influência da calagem no rendimento de matéria seca de plantas de cobertura e adubação verde, em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 25:897-904, 2001.

ERNANI, P.R.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V. Influência da calagem no rendimento de matéria seca de plantas de cobertura e adubação verde, em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 25:897-904, 2001.

ESHEL, G.; EGOZI, R.; GOLDWASSER, Y.; KASHTI, Y.; FINE, P.; HAYUT, E.; KAZUKRO, H.; RUBIN, B.; DAR, Z.; KEISAR, O.; DISEGNI, D.M. Benefits of growing potatoes under cover crops in a Mediterranean climate. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 211:1-9, 2015.

ESPINDOLA, J.A.A.; GUERRA, J.G.M.; ALMEIDA, D.L.; TEIXEIRA, M.G.; URQUIAGA, S. Decomposição e liberação de nutrientes acumulados em leguminosas herbáceas perenes consorciadas com bananeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 30:321-328, 2006.

FARIA, R.T.; OLITTA, A.F.L. Lâmina de irrigação na cultura do trifo utilizando o sistema de “aspersão em linha”. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 22:999-1008, 1987.

FERNANDES, F.C.S.; LIBARDI, P.L. Drenagem interna e lixiviação de nitrato em um Latossolo sob sucessão milho-braquiária-milho, com diferentes doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 33:1163-1173, 2009.

FERNANDES, L.A.; FURTINI NETO, A.E.; VASCONCELLOS, C.A.; GUEDES, G.A.A. Preparo do solo e adubação nitrogenada na produtividade do milho em latossolo sob vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 22:247-254, 1998.

FIDALSKI, F.; CAVALIERI-POLIZELI, K.M.V.; TORMENA, C.A.; ANGHINONI, G. AULER, P.A.M. Capacidade de suporte de carga do solo em sistemas de produção de laranja conservacionistas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 39:880-885, 2015.

FIGUEIREDO, C.C.; RESCK, D.V.S.; GOMES, A.C.; URQUIAGA, S. Sistemas de manejo na absorção de nitrogênio pelo milho em um Latossolo Vermelho no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 40:279-287, 2005.

FLINT, A.L.; FLINT, L.E. Particle density. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.). **Methods of soil analysis: Physical methods**. Part 4. SSSA Book Series n.5., American Society of Agronomy, 2002. p.229-240.

FLOSS, E.L. Aveia, um sustentáculo do sistema de semeadura direta. **Revista Plantio Direto**, 72:14-18, 2002.

FRANZLUEBBERS, A.J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. **Soil Tillage and Research**, 66:197-205, 2002.

FREEBAIRN, D.M.; WARD, L.D.; CLARKE, A.L.; SMITH, G.D. Research and development of reduced tillage systems for vertisols in Queensland, Australia. **Soil Tillage and Research**, 8:211-219, 1986.

GABRIEL, J.L.; VANCLOOSTER, M.; QUEMADA, M. Integrating water, nitrogen, and salinity in sustainable irrigated systems: cover crops versus fallow. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 140:A4014002, 2014.

GAMA-RODRIGUES, A.C.; GAMA-RODRIGUES, E.F.; BRITO, E.C. Decomposição e liberação de nutrientes de resíduos culturais de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho-Amarelo na região noroeste fluminense-RJ. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 31:1421-1428, 2007.

GAO, Y.; DUAN, A.; SUN, J.; LI, F.; LIU, Z.; LIU, H.; LIU, Z. Crop coefficient and water-use efficiency of winter wheat/spring maize strip. Intercropping. **Field Crops Research**, 111:65-73, 2009.

GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S. Spatiotemporal characteristics of drought in Serbia. **Journal Hydrology**, 510:110–123, 2014.

GREGORY, P.J.; SIMMONDS, L.P.; PILBEAM, C.J. Soil type, climatic regime, and the response of water use efficiency to crop management. **Agronomy Journal**, 92:814-820, 2000.

GROENEVELT, P.H.; BOLT, G.H. Waterretention in soil. **Soil Science**, 113:238-245, 1971.

GUIMARÃES G.M.; STONE, L.F.; BRUNINI, O. Adaptação do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) à seca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 10:70-75, 2006.

HELVEY, J.D.; PATRIC, J.H. Desing criteria for interception studies. **Internacional Association Science Hydrology Extract**, 67:131-137, 1965.

HILLEL D. **Introduction to environmental soil physics**. San Diego: Elsevier Academic Press; 2004.

HILLEL, D.; KRENTOS, V.D.; STYLIANOU, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. **Soil Science**, 114:395-400, 1972.

HILLEL, D. **Soil and water: physical principles and processes**. 3. ed. New York: Academic Presss, 1973. 288p.

HOLTZ, G.P. Dinâmica da decomposição da palhada e a distribuição do carbono, nitrogênio e fósforo numa rotação de culturas sob plantio direto na região de Carambei/PR. Curitiba. 1995. 129 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná, Paraná.

HUANG, M.B.; DANG, T.H.; GALLICHAND, J.; GOULET, M. Effect of increased fertilizer applications to wheat crop on soil-water depletion in the Loess Plateau, China. **Agriculture Water Management**, 58:267–278, 2003.

IBGE. Grupo de Coordenação de Estatísticas Agropecuárias – GCEA/IBGE, DPE, COAGRO. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. 2019. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_201003_5.shtm>. Acesso em: 18 outubro 2019.

IGUE, K. **Dinâmica da matéria orgânica e seus efeitos nas propriedades do solo**. In: Adubação verde no Brasil. Campinas: Fundação Cargill, 1984. p.232-267.

ISLAM, N.; WALLENDER, W.W.; MITCHELL, J.; WICKS, S.; HOWIRR, R.E. A comprehensive experimental study with mathematical modelling to investigate the effects os cropping practices on water balance variables. **Agriculture Water Management**, 82:129-147, 2006.

JADOSKI, S.O.; CARLESSO, R.; MELO, G.L.; RODRIGUES, M.; FRIZZO, Z. Manejo de irrigação para maximização do rendimento de grãos do feijoeiro. **Irriga**, 8:1-9, 2003.

JOYCE, B.A.; WALLENDER, W.W.; MITCHELL, J.P.; HUYCK, L.M.; TEMPLE, S.R.; BROSTROM, P.N.; HSIAO, T. C. Infiltration and soil water storage under winter cover cropping in California's Sacramento Valley. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, 45:315–326, 2002.

JUSTES, E. **Cover crops for sustainable farming**. Editions Quae (France) and Springer (The Netherlands). 2017. 91p.

JUSTES, E.; BEAUDOIN, N.; BERTUZZI, P.; CHARLES, R.; CONSTANTIN, J.; DÜRR, C.; HERMON, C.; JOANNON, A.; LE BAS, C.; MARY, B.; MIGNOLET, C.; MONTFORT, F.; RUIZ, L.; SARTHOU, J.P.; SOUCHÈRE, V.; TOURNEBIZE, J. **Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires: conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Synthèse du rapport d'étude.** INRA, France, 2012.

KASPAR, T.C.; RADKE, J.K.; LAFLEN, J.M. Small grain cover crops and wheel traffic effects on infiltration, runoff and erosion. **Journal Soil Water Conservation**, 56:160-164, 2001.

KASPAR, T.C.; SINGER, J.W. **The use of cover crops of manage soil.** In: HATFIELD, J.L.; SAUER, T.J. (Eds). *Soil Management: Building a stable base for agriculture.* 2011. pp.321-337.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia: relação solo planta.** São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 273p.

KIELING, A.S. Plantas de cobertura em sistema de plantio direto de tomate: efeitos sobre plantas espontâneas, atributos do solo e a produtividade de frutos em um processo de transição agroecológica. 2007. 127f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E. **Implantação e manejo do sistema plantio direto.** Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 36p. (Embrapa Trigo.Documentos, 20)

KRSTIC, D. VUJIC, S.; JACIMOVIC, G.; D'OTTAVIO, P.; RADANOVIC, Z.; ERIC, P; CUPINA, B. The effect of cover crops on soil water balance in rain-fed conditions. **Atmosphere**, 9:492, 2018.

KRUEGER, E.S.; OCHSNER, T.E.; PORTER, P.M.; BAKER, J.M. Winter rye cover crop management influences on soil water, soil nitrate, and corn development. **Agronomy Journal**, 103:316–323, 2011.

LAL, R. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. **Soil Tillage and Reearch**, 93:1-12, 2007.

LARA CABEZAS, W.R.L.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; SANTANA, D.G. Influência da cultura antecessora e da adubação nitrogenada na produtividade de milho em sistema plantio direto e solo preparado. **Ciência Rural**, 34:1005-1013, 2004.

LEMON, E.R. The potentialities for decreasing soil moisture evaporation loss. **Soil Science Society of American Journal**, 20:120-125, 1965.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo.** São Paulo: EDUSP, 2012. 352p.

LIBARDI, P.L.; MOTA, J.C.A.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; BRITO, A.S.; AMARO FILHO, J. Water balance components in covered and uncovered soil growing irrigated muskmelon. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 39:1322-1334, 2015.

LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.P.; BIGGAR, J.W. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society of American Journal**, 44:3-7, 1980.

LIBARDI, P.L.; SAAD, A.M. Balanço hídrico em cultura de feijão irrigada por pivô central em Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 18:529-532, 1994.

LIMA, V.E; LIMA, J.M.J.C. **Fundamentos de pedologia.** Curitiba: UFPR, 2000. 56p.

LIU, F.; STÜTZEL, H. Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to drought stress. **Scientia Horticulturae**, 102:15-27, 2004.

MAHBOUBI, A.A.; LAL, R.; FAUSSEY, N.R.; Twenty-eight years of tillage effects on two soils in Ohio. **Soil Science Society of American Journal**, 57:506-512, 1993.

MARTORANO, L.G.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, 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**, 13:397-405, 2009.

- MENEZES, L.A.S.; LEANDRO, W.M. Avaliação de espécies de coberturas do solo com potencial de uso em sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 34:173-180, 2004.
- MEYER, N.; BERGEZ, J.E.; CONSTANTIN, J.; JUSTES, E. Cover crops reduce water drainage in temperate climates: A meta-analysis. **Agronomy for Sustainable Development**, 39:3, 2019.
- MITCHELL, J.P.; PETERS, D.W.; SHENNAN, C. Changes in soil water storage in winter fallowed and cover cropped soils. **Journal of Sustainable Agriculture**, 15:19–31, 1999.
- MITCHELL, J.P.; SHRESTHA, A.; IRMAK, S. Trade-offs between winter cover crop production and soil water depletion in the San Joaquin Valley, California. **Journal of Soil and Water Conservation**, 70:430–440, 2015.
- MEISINGER, J.J.; HARGROVE, W.L.; MIKKELSEN, R.L.; WILLIAMS, J.R.; BENSON, V.W. **Effects of cover crops on groundwater quality**. In: Cover crops for clean water. Soil and Water Conservation Society. 1991. p.57–68.
- MODEL, N.S.; LEVIEN, R.; FROSI, R. A. Água armazenada e temperatura do solo em oito sistemas de manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, 1:41-49, 1995.
- MORAES, T.M.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J.C.; SILVA, V.R.; LUZ, D.B. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil Tillage and Research**, 155:351-362, 2016.
- MOTA, J.C.A.; LIBARDI P.L.; BRITO, A.S.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; AMARO FILHO, J. Armazenagem de água e produtividade do meloeiro irrigado por gotejamento, com a superfície do solo coberta e desnuda. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34:1721-31, 2010.
- MOURA, M.V.T.; MASQUES JÚNIOR, S.; BOTREL, T.A.; FRIZONE, J.A. Estimativa do consumo de água na cultura da cenoura (*daucuscarota*, L.) v. nantes superior, para a região de Piracicaba, através do método do balanço hídrico. **Scientia Agricola**, 51:284-291, 1994.
- MÜLLER, M.M.L.; CECCON, G.; ROSOLEM, C.A. Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 25:531-538, 2001.
- MUNKHOLM, L.J.; SCHJØNNING, P.; RASMUSSEN, K. J.; TANDERUP, K. Spatial and temporal effects of direct drilling on soil structure in the seedling environment. **Soil Tillage and Research**, 71:163-173, 2003.
- MUNÖZ-CARPENA, R.; RITTER, A.; BOSCH, D.D.; SCHAFFER, B.; POTTER, T.L. Summer cover crop impacts on soil percolation and nitrogen leaching from a winter corn field. **Agricultural Water Management**, 95:633-644, 2008.
- MURAOKA, T.; AMBROSANO, E.J.; ZAPATA, F.; BORTOLETTO, N.; MARTINS, A.L. M.; TRIVELIN; P.C.O.; BOARETTO, A.E.; SCIVITTARO, W.B. Eficiência de abonos verdes (*crotalaria* y *mucuna*) y urea, aplicadas solos o juntamente, como fuentes de N para el cultivo de arroz. **Terra**, 20:17-23, 2002.
- MURUNGU, F.S.; CHIDUZA, C.; MUCHAONYERWA, P.; MNKENI, P.N.S. Mulch effects on soil moisture and nitrogen, weed growth and irrigated maize productivity in a warm-temperate climate of South Africa. **Soil Tillage and Research**, 112:58–65, 2011.
- MUZILLI, O. Influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 7:95-102, 1983.
- NUNES, U.R.; ANDRADE JÚNIOR, V.C.A.; SILVA, E.B.; SANTOS, N.F.; COSTA, H.A.O.; FERREIRA, C.A. Produção de palhada de plantas de cobertura e rendimento do feijão em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 41:943-948, 2006.
- NIELSEN, D.C.; LYON, D.J.; HERGERT, G.W.; HIGGINS, R.K.; HOLMAN, J.D. Cover crop biomass production and water use in the Central Great Plains. **Agronomy Journal**, 107:2047–2058, 2015a.

NIELSEN, D.C.; LYON, D.J.; HERGERT, G.W.; HIGGINS, R.K.; CALDERÓN, F.J.; VIGIL, M.F. Cover crop mixtures do not use water differently than single-species plantings. **Agronomy Journal**, 107:1025–1038, 2015b.

NIELSEN, D.C.; VIGIL, M.F. Legume green fallow effects on soil water content at wheat planting and wheat yield. **Agronomy Journal**, 97:684–689, 2005.

NIELSEN, D.C.; VIGIL, M.F. Searching for synergism in dryland cropping systems in the central Great Plains. **Field Crops Research**, 158:34–42, 2014.

OLIVEIRA, A.D.; FERNANDES, E.J.; RODRIGUES, T.J.D. Condutância estomática como indicador de estresse hídrico em feijão. **Engenharia Agrícola**, 25:86-95, 2005.

OLIVEIRA, R. A. Plantas de cobertura em pré-safra e adubação nitrogenada no milho em plantio direto. 2015. 60 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal.

OLIVEIRA, T.K.; CARVALHO, G.J.; MORAES, R.N.S. Plantas de cobertura e seus efeitos sobre o feijoeiro em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 37:1079-1087, 2002.

PASSIOURA, J.B. Grain yield, harvest index and water use of wheat. **Journal of the Australian Institute of Agriculture Science**, 43:117-120, 1977.

PEÑA-CABRIALES, J.J.; CASTELLANOS, J.Z. Effects of water stress on N₂ fixation and grain yield of *Phaseolus vulgaris* L. **Plant and Soil**, 152:151-155, 1993.

PERIN, A.; SANTOS, R.H.S.; URQUIAGA, S.; GUERRA, J.G.M.; CECON, P.R. Produção de fitomassa, acúmulo de nutrientes e fixação biológica de nitrogênio por adubos verdes em cultivo isolado e consorciado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 39:35-40, 2004.

POEPLAU, C.; DON, A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops - A meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 200:33–41, 2015.

PUPPALA, N.; FOWLER, J.L.; JONES, T.L.; GUTSCHICK, V.; MURRAY, L. Evapotranspiration, yield, and water-use efficiency responses of *Lesquerella fendleri* at different growth stages. **Industrial Crops and Products**, 21:33-47, 2005.

QI, Z.; HELMERS, M.J. Soil water dynamics under winter rye cover crop in central Iowa. **Vadose Zone Journal**, 9:53–60, 2010.

QI, Z.; HELMERS, M.J.; KALEITA, A.L. Soil water dynamics under various agricultural land covers on a subsurface drained field in northcentral Iowa, USA. **Agriculture Water Management**, 98:665–674, 2011a.

QI, Z.; HELMERS, M.J.; MALONE, R.W.; THORP, K.R. Simulating long-term impacts of winter rye cover crop on hydrologic cycling and nitrogen dynamics for a corn-soybean crop system. **Transactions of the ASABE**, 54:1575–1588, 2011b.

RAIJ, B. van.; QUAGGIO, J.A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: Instituto Agrônomo, (Boletim Técnico, 81), 1983. 31p.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2016.

RAMALHO, M.A.P.; SILVA, G.S.; DIAS, L.A.S. Genetic plant improvement and climate changes. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, 9:189-195, 2009.

REICHARDT, K.; ANGELOCCI, L.R.; BACCHI, O.O.S.; PILOTTO, J.E. Daily rainfall variability at a local scale (1,000 ha), in Piracicaba, SP, Brazil, and its implications on soil water recharge. **Scientia Agricola**, 52:43-49, 1995.

REICHARDT, K. **Água em sistemas agrícolas**. São Paulo – SP: Manole, 1990. 188p.

- REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; SANTOS, J.M. **An analysis of soil-water movement in the field: II**, water balance in a snap bean crop. Piracicaba: CENA/USP, 1974. 19p. (CENA. Boletim Científico, 22).
- REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; SAUNDERS, L.C.U. Dinâmica da água em solos cultivados com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 3:1-5, 1979.
- REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Scaling of horizontal infiltration into homogeneous soil. **Soil Science Society of American Journal**, 36:241-245, 1972.
- REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478p.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil Tillage and Research**, 102:242-254, 2009.
- REYNOLDS, W.D.; GREGORICH, E.G.; CURNOW, W.E. Characterization of water transmission properties in tilled and untilled soils using tension infiltrometers. **Soil Tillage and Research**, 33:117-131, 1995.
- RICHARDS, L.A. Capillary conduction of liquids in porous mediums. **Physics**, 1:318-333, 1931.
- ROCHA, G.C. Estabilidade temporal da distribuição espacial da armazenagem, do gradiente de potencial total e do potencial mátrico da água, em um solo cultivado com citrus. 2004. 117 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- ROSE, C.W. **Agricultural physics**. Oxford, Pergamon Press, 1966. 230p.
- ROSE, C.W.; STERN, W.R. Determination of withdrawal of water from soil by crop roots as a function of depth and time. **Australian Journal of Soil Research**, 5:11-19, 1967.
- SALADO-NAVARRO, L.R.; SINCLAIR, T.R. Crop rotations in Argentina: analysis of water balance and yield using crop models. **Agricultural Systems**, 102:11-16, 2009.
- SALAKO, F.K.; TIAN, G. Soil water depletion under various leguminous cover crops in the derived savanna of West Africa. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 100:173-180, 2003.
- SALMERÓN, M.; ISLA, R.; CAVERO, J. Effect of winter cover crop species and planting methods on maize yield and N availability under irrigated Mediterranean conditions. **Field Crops Research**, 123:89-99, 2011.
- SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5.ed. Brasília: Embrapa, 2018. 353p.
- SECCO, D.; SILVA, V.R.; RUBIN, R.B.; JUNIOR, S.A.G.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Efeitos da compactação nos atributos físicos do solo e na produtividade da cultura do trigo, em Latossolo Vermelho Escuro sob sistema plantio direto. In: 13ª Reunião Brasileira de Manejo e conservação do Solo e da Água, Ilhéus. Resumos, Universidade Federal da Bahia, 2000.
- SCHNEPF, M.; COX, C. **Environmental benefits of conservation on cropland: The status of our knowledge**. Soil Water and Conservation Society, Ankeny, Iowa, 2006. 326p.
- SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (complete sample). **Biometrika**, 52:591-611, 1965.
- SHARMA, V.; IRMAK, S. Soil-Water Dynamics, Evapotranspiration, and Crop Coefficients of Cover-Crop Mixtures in Seed Maize Cover-Crop Rotation Fields. II: Grass-Reference and Alfalfa-Reference Single (Normal) and Basal Crop Coefficients. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 143:04017033, 2017.
- SHEWEN, Y.; TANNER, C.B. Radiative and conductive transport of heat through flail-chopped corn residue. **Soil Science Society of American Journal**, 54:653-658, 1990.

SHEPTUKHOV, V.N.; NESTEROVA, A.V.; KONOVALOV, S.N.; SKVORTOVA, E.B. The effect of different tillage systems on the water regime, structure, and hydrophysical properties of soddy-podzolic soils. **Eurasian Soil Science**, 30:311-317, 1994.

SILVA, M.L.N.; CURI, N.; BLANCANEUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 35:2485-2492, 2000.

SILVA, R.A.B.; LIMA, J.R.S.; ANTONIMO, A.C.A.; GONDIM, S.S.; SOUZA, E.S.; BARROS JÚNIOR, G. Balanço hídrico em neossoloregolítico cultivado com braquiária (*Brachiaria decumbens* Stapf). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38:147-157, 2014.

SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BORTOLUZZI, E.C. Soil water dynamics related to the degree of compaction of two Brazilian Oxisols under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 33:1097-1104, 2009.

SILVEIRA, P.M.; STONE, L.F. Balanço de água na cultura do feijão em latossolo vermelho-amarelo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 14:111-115, 1979.

SILVEIRA, P.M.; STONE, L.F.; ALVES JUNIOR, J.; SILVA, J.G. Efeitos do manejo do solo sob plantio direto e de culturas na densidade e porosidade de um Latossolo. **Bioscience Journal**, 24:53-59, 2008.

SODRÉ FILHO, J.; CARDOSO, A.N.; CARMONA, R.; CARVALHO, A.M. Fitomassa e cobertura do solo de culturas de sucessão ao milho na Região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 39:327-334, 2004.

SORATTO, R.P.; ORIVALDO, A.R.F.; RODRIGUES, R.A.F.; BUZETTI, S.; SILVA, T.R.B. Resposta do feijoeiro ao preparo do solo, manejo de água e parcelamento do nitrogênio. **Acta Scientiarum: Agronomy**, 25:89-96, 2003.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 15:229-235, 1991.

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. **Determinação da evapotranspiração para fins de irrigação**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1995. 49p. (EMBRAPA-CNPAP, Documentos, 55)

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**, 25:395-401, 2001.

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M.; MOREIRA, J.A.A.; BRAZ, A.J.B.P. Evapotranspiração do feijoeiro irrigado em plantio direto sobre diferentes palhadas de culturas de cobertura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 41:577-582, 2006.

STUTE, J.K.; POSNER, J.L. Synchrony between legume nitrogen release and corn demand in the upper Midwest. **Agronomy Journal**, 87:1063-1069, 1995.

TANGYUAN, N.; BIN, H.; NIANYUAN, J.; SHENZHONG, T.; ZENGJIA, L. Effects of conservation tillage on soil porosity in maize-wheat cropping system. **Plant, Soil and Environment**, 8:327-333, 2009.

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER Jr., J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse textured soil materials. **Soil Science**, 102:18-22, 1966.

TAYLOR, H.M. **Managing root system for efficient water use: an overview**. In: TAYLOR, H.W.; JORDAN, W.; SINCLAIR, R.R., ed. Limitations to efficient water use in crop production. New York, American Society of Agronomy. 1983. p.87-114.

TONITTO, C.; DAVID, M.B.; DRINKWATER, L.E. Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: a meta-analysis of crop yield and N dynamics. **Agriculture Ecosystems and Environment**, 112:58-72, 2006.

TOSTI, G.; BENINCASA, P.; FARNESELLI, M.; TEI, F.; GUIDUCCI, M. Barley hairy vetch mixture as cover crop for green manuring and the mitigation of N leaching risk. **European Journal Agronomy**, 54:34-39, 2014.

- TORMENA, C.A.; ROLOFF, G.; SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 22:301-309, 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 distroférrico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 8:65-71, 2004.
- TORRES, J.L.R. Estudo das plantas de cobertura na rotação milho-soja em sistema de plantio direto no cerrado, na região de Uberaba-MG. 2003. 125 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal). Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal.
- TORRES, J.L.R.; PEREIRA, M.G.; ANDRIOLI, I.; POLIDORO, J.C.; FABIAN, A.J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos de culturas de plantas de cobertura em um solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29:309-618, 2005.
- TORRES, J.L.R.; PEREIRA, M.G.; FABIAN, A.J. Produção de fitomassa por plantas de cobertura e mineralização de seus resíduos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 43:421-428, 2008.
- TRIBOUILLOIS, H.; CRUZ, P.; COHAN, J.P.; JUSTES, E. Modelling agroecosystem nitrogen functions provided by cover crop species in bispecific mixtures using functional traits and environmental factors. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 207:218–228, 2015.
- UNGER, P.W.; VIGIL, M.F. Cover crop effects on soil water relationships. **Journal Soil Water Conservation**, 53:200–207, 1998.
- VAUCHAUD, G; TEHEL, J.; BOCALATO, R. **Contrôle automatique in situ des transferts de l'eau de la zone non saturée**. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Isotopes and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. Vienna, 1973. p.1-5.
- VALNIR JÚNIOR, M.; COSTA, R.N.T.; AGUIAR, J.V. de. Análise de componentes do balanço hídrico em cultura de caupi (*Vigna unguiculata* (L) Walp), sob condições de recarga hídrica natural. **Irriga**, 6:135-153, 2001.
- van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, 44:892-898, 1980.
- VIEIRA, H. J. Parâmetros hídricos e de crescimento de duas variedades de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) sob diferentes condições de disponibilidade de água no solo. 1984. 153 f. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia). Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- VOORHEES, W.B.; LINDSTROM, M.J. Long-term effects of tillage method on soil tilth independent of wheel traffic compaction. **Soil Science Society of American Journal**, 48:152-156, 1984.
- WANG, Y.Q.; SHAO, M.A. Spatial variability of soil physical properties in a region of the Loess Plateau of PR China subject to wind and water erosion. **Land Degradation and Development**, 24:296-304, 2013.
- WARD, P.R. Predicting the impact of perennial phases on average leakage from farming systems in south-western Australia. **Australian Journal Agricultural Research**, 57:269-280, 2006.
- WARD, P.R.; FLOWER, K.C.; CORDINGLEY, N.; WEEKS, C.; MICIN, S. F. Soil water balance with cover crops and conservation agriculture in a Mediterranean climate. **Field Crops Research**, 132:33–39, 2012.
- WAGNER-RIDDLE, C., GILLESPIE, T.J.; HUNT, L.A.; SWANTON, C.J. Modeling a rye cover crop and subsequent soybean yield. **Agronomy Journal**, 89:208–218, 1997.
- WATSON, K.K. An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. **Water Resources Research**, 2:709-715, 1966.
- WÜRSCHÉ, W., DENARDIN, L.E. **Conservação e manejo dos solos** - I. Planalto Rio-grandense. Considerações gerais. Circular Técnica Nacional de Pesquisa do Trigo, Passo Fundo, n.2, p.1-20, 1980.
- XU, X.; NIEBER, J.L.; GUPTA, S.C. Compaction effects on the gas diffusion coefficients in soil. **Soil Science Society of American Journal**, 56:1743-1750, 1992.

YANG, W.; FENG, G.; ADELI, A.; KERSEBAUM, K.C.; JENKINS, J.N.; LI, P. Long-term effect of cover crop on rainwater balance components and use efficiency in the no-tilled and rainfed corn and soybean rotation system. **Agriculture Water Management**, 219:27-39, 2019.

YANG, Y. LIU, D.L.; ANWAR, M.R.; O'LEARY, G.; MACADAM, I.; YANG, Y. Water use efficiency and crop water balance of rainfed wheat in a semi-arid environment: sensitivity of future changes to projected climate changes and soil type. **Theoretical and Applied Climatology**, 123:565–579, 2016.

YU, Y.; LOISKANDL, W.; KAUL, H.P.; HIMMELBAUER, M.; WEI, W.; CHEN, L.; BODNER, G. Estimation of runoff mitigation by morphologically different cover crop root systems. **Journal of Hydrology**, 538:667–676, 2016.

ZHANG, D.; YAO, P.; NA, Z.; CAO, W.; ZHANG, S.; LI, Y. Soil water balance and water use efficiency of dryland wheat in different precipitation years in response to green manure approach. **Scientific Reports**, 6:26856, 2016.

ZHANG, S.L.; SADRAS, V.; CHEN, X.P.; ZHANG, F.S. Water use efficiency of dryland wheat in the Loess Plateau in response to soil and crop management. **Field Crops Research**, 151:9–18, 2013.

ZOTARELLI, L.; ZATORRE, N.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S.; JANTALIA, C.P.; FRANCHINI, J.C.; ALVEA, B.J.R. Influence of no-tillage and frequency of a green manure legume in crop rotations for balancing N outputs and preserving soil organic C stocks. **Field Crops Research**, 32:185-195, 2012.

APÊNDICES

APÊNDICE A. Descrição Morfológica do Perfil de Solo.

DATA – 04/06/2014

CLASSIFICAÇÃO ATUAL – **Latossolo Vermelho Distrófico férrico**

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO, ESTADO E COORDENADAS – Centro Experimental Central do Instituto Agronômico (Fazenda Santa Elisa) – Campinas/SP. 22°54'S, 47°05'W.

SITUAÇÃO, DECLIVE E COBERTURA VEGETAL SOBRE O PERFIL – Perfil descrito em trincheira no experimento em sistema de plantio direto na cultura da soja.

ALTITUDE – 669 metros.

LITOLOGIA – Diabásio.

FORMAÇÃO GEOLÓGICA – Suítes Básicas.

CRONOLOGIA – Neocenozóico.

MATERIAL ORIGINÁRIO – Produto de alteração do material supracitado.

PEDREGOSIDADE – Não pedregoso.

ROCHOSIDADE – Não rochoso.

RELEVO LOCAL – Suave ondulado.

RELEVO REGIONAL – ondulado.

EROSÃO – Não aparente.

DRENAGEM – Bem drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA – Floresta tropical subcaducifólia.

USO ATUAL – Leguminosa (soja).

CLIMA – Cwa, da classificação de Köppen.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap** 0,00 – 0,10 m, bruno-avermelhado-escuro (2,5YR 2,5/4, úmida); argila; moderada, pequena a média, blocos angulares e subangulares; friável, muito plástica e pegajosa; transição ondulada e gradual.
- BA** 0,10 – 0,30 m, vermelho-escuro (10R 3/6, úmida); muito argilosa; moderada a forte, pequena a média, blocos angulares e subangulares que desfazem-se facilmente a granular; muito friável, muito plástica e pegajosa; transição ondulada e difusa.
- Bw₁** 0,30 – 0,70 m, vermelho-escuro (2,5YR 3/6, úmida); muito argilosa; moderada a forte, pequena a média; blocos angulares e subangulares que se desfazem facilmente a granular; muito friável, muito plástica e muito pegajosa; transição ondulada e difusa.
- Bw** + 0,70 m, vermelho-escuro (2,5YR 3/6, úmida); muito argilosa; moderada a forte, pequena a média, blocos angulares que se desfazem facilmente a granular; cerosidade pouca e fraca; muito friável, muito plástica e muito pegajosa; transição ondulada e difusa.

RAÍZES: Muito finas e grossa em A e AB; Comuns e finas em Bw₁ e Bw₂.

OBSERVAÇÕES: Perfil descrito úmido.

Perfil descrito por: Discentes da disciplina de Pedologia Aplicada e Pedometria do curso de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical do Instituto Agronômico, Campinas/SP.

Figura 1. Perfil de Latossolo Vermelho Distrófico férrico.

APÊNDICE B. Curvas de retenção da água no solo.

Figura 2. Curvas de retenção da água no solo no tratamento PC-Gramínea em cada camada de solo avaliada. **(A):** 0,00-0,20 m. **(B):** 0,20-0,40 m. **(C):** 0,40-0,60 m; **(D):** 0,60-0,80 m; **(E):** 0,80-1,00 m. **(F):** Comparativo de todas as camadas de solo para o mesmo tratamento.

Figura 3. Curvas de retenção da água no solo no tratamento PC-Leguminosa em cada camada de solo avaliada. **(A):** 0,00-0,20 m. **(B):** 0,20-0,40 m. **(C):** 0,40-0,60 m; **(D):** 0,60-0,80 m; **(E):** 0,80-1,00 m. **(F):** Comparativo de todas as camadas de solo para o mesmo tratamento.

Figura 4. Curvas de retenção da água no solo no tratamento PC-Pousio em cada camada de solo avaliada. **(A):** 0,00-0,20 m. **(B):** 0,20-0,40 m. **(C):** 0,40-0,60 m; **(D):** 0,60-0,80 m; **(E):** 0,80-1,00 m. **(F):** Comparativo de todas as camadas de solo para o mesmo tratamento.

Figura 5. Curvas de retenção da água no solo no tratamento PD-Gramínea em cada camada de solo avaliada. (A): 0,00-0,20 m. (B): 0,20-0,40 m. (C): 0,40-0,60 m; (D): 0,60-0,80 m; (E): 0,80-1,00 m. (F): Comparativo de todas as camadas de solo para o mesmo tratamento.

Figura 6. Curvas de retenção da água no solo no tratamento PD-Leguminosa em cada camada de solo avaliada. **(A):** 0,00-0,20 m. **(B):** 0,20-0,40 m. **(C):** 0,40-0,60 m; **(D):** 0,60-0,80 m; **(E):** 0,80-1,00 m. **(F):** Comparativo de todas as camadas de solo para o mesmo tratamento.

Figura 7. Curvas de retenção da água no solo no tratamento PD-Pousio em cada camada de solo avaliada. **(A):** 0,00-0,20 m. **(B):** 0,20-0,40 m. **(C):** 0,40-0,60 m; **(D):** 0,60-0,80 m; **(E):** 0,80-1,00 m. **(F):** Comparativo de todas as camadas de solo para o mesmo tratamento.

Tabela 1. Parâmetros de ajuste da curva de retenção de água no solo obtidos pela equação utilizada por van Genuchten.

Camadas (m)	α (kPa ⁻¹)	m	n	θ_r (m ³ m ⁻³)	θ_s (m ³ m ⁻³)	r ²
PC-Gramínea						

0,00-0,20	1,6499	0,2922	1,4129	0,2256	0,5790	0,94
0,20-0,40	3,6709	0,2473	1,3286	0,2329	0,5800	0,93
0,40-0,60	2,8560	0,2831	1,3949	0,2424	0,6174	0,97
0,60-0,80	2,5680	0,2915	1,4114	0,2507	0,6021	0,95
0,80-1,00	2,2037	0,3285	1,4892	0,2311	0,6127	0,97
PC-Leguminosa						
0,00-0,20	1,4429	0,2873	1,4030	0,1943	0,5929	0,94
0,20-0,40	1,4493	0,3327	1,4985	0,2261	0,5508	0,91
0,40-0,60	1,6569	0,3100	1,4492	0,2232	0,5766	0,91
0,60-0,80	3,6393	0,2353	1,3077	0,2206	0,5681	0,83
0,80-1,00	2,3865	0,3045	1,4378	0,2172	0,6162	0,98
PC-Pousio						
0,00-0,20	1,2537	0,2823	1,3933	0,2103	0,5613	0,92
0,20-0,40	1,2986	0,3209	1,4725	0,2184	0,5757	0,94
0,40-0,60	1,0859	0,3010	1,4305	0,2239	0,5822	0,92
0,60-0,80	0,7922	0,2970	1,4226	0,2667	0,5383	0,89
0,80-1,00	1,2790	0,2782	1,3854	0,2548	0,5498	0,95
PD-Gramínea						
0,00-0,20	1,9521	0,2919	1,4123	0,2277	0,5760	0,98
0,20-0,40	2,2299	0,3034	1,4355	0,2381	0,5943	0,96
0,40-0,60	2,8564	0,3050	1,4388	0,2294	0,6051	0,96
0,60-0,80	2,4177	0,1105	1,1242	0,0834	0,5428	0,95
0,80-1,00	1,2590	0,3269	1,4857	0,2606	0,5715	0,93
PD-Leguminosa						
0,00-0,20	1,9785	0,2707	1,3713	0,2166	0,5698	0,98
0,20-0,40	2,9357	0,2595	1,3504	0,2285	0,5933	0,98
0,40-0,60	3,5170	0,1114	1,1254	0,1648	0,5431	0,95
0,60-0,80	2,3827	0,2829	1,3946	0,2446	0,6097	0,95
0,80-1,00	1,2820	0,3482	1,5341	0,2607	0,6178	0,97
PD-Pousio						
0,00-0,20	1,3890	0,2848	1,3983	0,2445	0,5613	0,99
0,20-0,40	2,7007	0,2667	1,3637	0,2453	0,5808	0,98
0,40-0,60	2,7300	0,2819	1,3925	0,2422	0,6186	0,98
0,60-0,80	1,6990	0,3368	1,5077	0,2392	0,6365	0,96
0,80-1,00	1,3235	0,3447	1,5260	0,2451	0,6207	0,95

APÊNDICE C. Potenciais mátricos do perfil instantâneo.

Tabela 2. Potenciais mátricos (m) em função do tempo de redistribuição para as profundidades de instalação dos tensiômetros.

Tempo (h)	Profundidade (m)									
	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
0	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10
24	-0,90	-0,27	-0,32	-0,31	-0,32	-0,29	-0,39	-0,53	-0,54	-0,50
48	-0,42	-0,41	-0,41	-0,39	-0,39	-0,36	-0,49	-0,65	-0,64	-0,66
72	-0,56	-0,54	-0,50	-0,47	-0,44	-0,44	-0,60	-0,76	-0,77	-0,77
96	-0,64	-0,59	-0,56	-0,53	-0,53	-0,50	-0,68	-0,83	-0,88	-0,86
120	-0,70	-0,67	-0,63	-0,59	-0,58	-0,56	-0,75	-0,90	-0,96	-0,92
144	-0,72	-0,74	-0,70	-0,64	-0,63	-0,63	-0,83	-0,99	-0,98	-1,01
168	-0,77	-0,74	-0,70	-0,65	-0,60	-0,64	-0,83	-0,98	-0,96	-1,02
192	-0,84	-0,79	-0,75	-0,71	0,61	-0,69	-0,88	-1,03	-0,98	-1,07
216	-0,86	-0,81	-0,78	-0,73	-0,65	-0,72	-0,92	-1,08	-1,03	-1,10
240	-0,89	-0,84	-0,80	-0,75	-0,80	-0,75	-0,96	-1,12	-1,21	-1,13
264	-0,93	-0,86	-0,83	-0,78	-0,84	-0,79	-0,99	-1,12	-1,13	-1,12
288	-0,94	-0,91	-0,86	-0,81	-0,87	-0,83	-1,00	-1,23	-1,29	-1,21
312	-0,96	-0,96	-0,91	-0,84	-0,89	-0,85	-1,04	-1,25	-1,31	-1,24
336	-0,99	-1,01	-0,97	-0,88	-0,82	-0,88	-1,06	-1,27	-1,18	-1,25
360	-0,99	-0,99	-0,95	-0,90	-0,89	-0,90	-1,09	-1,27	-1,30	-1,29
384	-0,98	-0,96	-0,93	-0,89	-0,82	-0,92	-1,11	-1,27	-1,31	-1,30
408	-1,50	-1,00	-0,98	-0,93	-0,75	-0,94	-1,16	-1,33	-1,37	-1,34
432	-1,08	-1,03	-0,99	-0,95	-0,73	-0,97	-1,17	-1,33	-1,31	-1,34
456	-1,08	-1,05	-1,02	-0,99	-0,73	-1,03	-1,13	-1,25	-1,10	-1,39
480	-1,08	-1,04	-1,00	-0,97	-0,74	-0,99	-1,18	-1,28	-1,17	-1,36

APÊNDICE D. Funções $K(\theta)$ obtidas para cada tratamento.

Tabela 3. Funções $K(\theta)$ (m hora⁻¹) obtidas para cada tratamento a 0,70 m (plantas de cobertura).

Tratamento	Função $K(\theta)$
PC-Gramínea	$K(\theta) = 0,0458 e^{66,67 (\theta - 0,459)}$
PC-Leguminosa	$K(\theta) = 0,0434 e^{71,94 (\theta - 0,437)}$
PC-Pousio	$K(\theta) = 0,0303 e^{61,73 (\theta - 0,479)}$
PD-Gramínea	$K(\theta) = 0,0426 e^{71,43 (\theta - 0,478)}$
PD-Leguminosa	$K(\theta) = 0,0338 e^{62,11 (\theta - 0,470)}$
PD-Pousio	$K(\theta) = 0,0444 e^{53,48 (\theta - 0,479)}$

Tabela 4. Funções $K(\theta)$ (m hora⁻¹) obtidas para cada tratamento a 0,80 m (culturas do feijão e do triticle).

Tratamento	Função $K(\theta)$
PC-Gramínea	$K(\theta) = 0,0610 e^{85,47 (\theta - 0,459)}$
PC-Leguminosa	$K(\theta) = 0,0521 e^{90,91 (\theta - 0,437)}$
PC-Pousio	$K(\theta) = 0,0348 e^{77,52 (\theta - 0,480)}$
PD-Gramínea	$K(\theta) = 0,0452 e^{89,96 (\theta - 0,480)}$
PD-Leguminosa	$K(\theta) = 0,0479 e^{79,36 (\theta - 0,470)}$
PD-Pousio	$K(\theta) = 0,0663 e^{69,44 (\theta - 0,480)}$

APÊNDICE E. Precipitação e densidade de fluxo.

Tabela 5. Densidade de fluxo média e precipitação para o ciclo das plantas de cobertura

Data	Precipitação (mm)	Densidade de fluxo média (mm dia ⁻¹)					
		PC-Gramínea	PC-Leguminosa	PC-Pousio	PD-Gramínea	PD-Leguminosa	PD-Pousio
25/10/2018	9,40	-0,0086	-0,1526	-0,5816	0,0532	0,1144	-0,0605
26/10/2018	9,00	0,0259	-0,1282	-0,5738	0,0196	0,1192	-0,0106
27/10/2018	7,00	0,0228	-0,1198	-0,6552	-0,0263	0,0831	-0,0487
28/10/2018	1,80	0,0118	-0,1383	-0,9631	-0,1224	-0,0250	-0,3134
29/10/2018	0,00	0,0072	-0,1308	-0,8492	-0,1268	-0,0698	-0,2704
30/10/2018	0,00	-0,0830	-0,0338	-0,4926	-0,3897	-0,1600	-0,3730
31/10/2018	0,00	-0,0115	-0,0131	-0,3915	-0,2818	-0,1039	-0,3118
01/11/2018	0,00	0,0116	0,0075	-0,2636	-0,2583	-0,0562	-0,2538
02/11/2018	0,00	0,0644	0,0421	-0,1693	-0,1527	0,0233	-0,1942
03/11/2018	0,00	0,0512	0,0219	-0,1345	-0,0994	0,0222	-0,1629
04/11/2018	93,2	-2,5847	-3,7307	-5,5658	-3,6553	-3,5200	-3,4133
05/11/2018	0,00	-0,6023	-1,0707	-1,5156	-1,0698	-0,9112	-1,0308
06/11/2018	0,00	-0,4051	-0,5944	-1,0872	-0,6509	-0,4928	-0,6667
07/11/2018	0,00	-0,2855	-0,3753	-0,7399	-0,4196	-0,3231	-0,4030
08/11/2018	2,20	-0,2225	-0,2550	-0,8243	-0,3717	-0,1312	-0,3165
09/11/2018	0,00	-0,1586	-0,1779	-0,4596	-0,2595	-0,1325	-0,2625
10/11/2018	0,00	-0,1127	-0,0521	-0,3405	0,0768	-0,0731	-0,2212
11/11/2018	0,20	-0,0870	-0,0081	-0,2287	-0,1238	-0,0234	-0,1824
12/11/2018	0,00	-0,0577	0,0436	-0,1570	-0,0541	0,0438	-0,1309
13/11/2018	0,00	-0,0180	0,1028	-0,0407	0,0389	0,1236	-0,0697
14/11/2018	0,00	0,0058	0,1354	0,0485	0,0914	0,1620	-0,0275
15/11/2018	0,00	0,0307	0,2145	0,1354	0,1335	0,2329	0,0160
16/11/2018	1,60	0,0500	0,2516	0,2313	0,1709	0,2770	0,0567
17/11/2018	0,00	0,0731	0,2548	0,3168	0,2130	0,2850	0,0983
18/11/2018	0,00	0,0879	0,2540	0,3709	0,2320	0,2926	0,1265
19/11/2018	47,4	0,0674	0,2186	0,3946	0,2218	0,2506	0,1802
20/11/2018	9,40	-0,8672	-0,0386	-0,3304	-1,3250	0,0788	-0,6181
21/11/2018	0,00	-0,7268	-0,1994	-0,8357	-1,0985	-0,6273	-0,7947
22/11/2018	0,00	-0,5098	-0,2367	-0,8094	-0,8085	-0,5697	-0,7203
23/11/2018	1,20	-0,3355	-0,2390	-0,6694	-0,5238	-0,3998	-0,5265

Tabela 6. Densidade de fluxo média e precipitação para o ciclo da cultura do feijão.

(continua)

Data	Precipitação (mm)	Densidade de fluxo média (mm dia ⁻¹)					
		PC-Gramínea	PC-Leguminosa	PC-Pousio	PD-Gramínea	PD-Leguminosa	PD-Pousio
12/01/2019	0,00	-0,0420	0,0004	-0,0888	-0,0278	-0,0422	-0,0485
13/01/2019	0,10	-0,0360	-0,0028	-0,0746	-0,0233	-0,0327	-0,0371
14/01/2019	0,00	-0,0325	-0,0059	-0,0667	-0,0227	-0,0264	-0,0344
15/01/2019	0,00	-0,0324	-0,0053	-0,0719	-0,0255	-0,0288	-0,0328
16/01/2019	0,00	-0,0251	-0,0018	-0,0603	-0,0190	-0,0239	-0,0350
17/01/2019	1,00	-0,0276	-0,0044	-0,0669	-0,0213	-0,0213	-0,0284
18/01/2019	0,00	-0,0261	-0,0058	-0,0606	-0,0252	-0,0199	-0,0240
19/01/2019	0,90	-0,0049	-0,0083	-0,0536	-0,0113	-0,0101	-0,0210
20/01/2019	0,00	-0,0056	-0,0075	-0,0490	-0,0098	-0,0084	-0,0167
21/01/2019	7,30	-0,0060	-0,0071	-0,0432	-0,0077	-0,0089	-0,0148
22/01/2019	0,00	-0,0049	-0,0084	-0,0417	-0,0063	-0,0079	-0,0130
23/01/2019	0,00	-0,0035	-0,0055	-0,0379	-0,0052	-0,0057	-0,0129
24/01/2019	22,4	-0,0019	-0,0045	-0,0337	-0,0043	-0,0061	-0,0115
25/01/2019	39,2	-0,1362	-0,1297	-0,3508	-0,4430	-0,3221	-0,2587
26/01/2019	11,2	-0,1043	-0,1257	-0,3655	-0,3532	-0,2440	-0,2056
27/01/2019	0,20	-0,0738	-0,1145	-0,3770	-0,2340	-0,1666	-0,1876
28/01/2019	1,00	-0,0347	-0,0826	-0,3234	-0,0712	-0,0917	-0,1521
29/01/2019	0,00	-0,0386	-0,0627	-0,1730	-0,0724	-0,0633	-0,0971
30/01/2019	13,6	-0,0234	-0,0416	-0,1416	-0,0499	-0,0376	-0,0697
31/01/2019	0,00	-0,0172	-0,0337	-0,1072	-0,0394	-0,0310	-0,0623
01/02/2019	0,00	-0,0094	-0,0246	-0,0801	-0,0282	-0,0241	-0,0460
02/02/2019	0,00	-0,0064	-0,0197	-0,0672	-0,0230	-0,0191	-0,0272
03/02/2019	0,00	0,0018	-0,0143	-0,0427	-0,0178	-0,0129	-0,0217
04/02/2019	4,30	0,0019	-0,0109	-0,0273	-0,0105	-0,0085	-0,0179
05/02/2019	0,00	0,0019	-0,0077	-0,0167	-0,0049	-0,0052	-0,0158
06/02/2019	0,00	0,0065	-0,0045	-0,0038	-0,0071	0,0024	-0,0109
07/02/2019	36,6	0,0033	-0,0056	-0,0621	-0,0080	-0,0066	-0,0126
08/02/2019	0,00	0,0006	-0,0157	-0,0969	-0,0118	-0,0216	-0,0326
09/02/2019	0,00	-0,0002	-0,0257	-0,1050	-0,0175	-0,0324	-0,0489
10/02/2019	0,00	0,0094	-0,0114	-0,0445	0,0014	-0,0057	-0,0329
11/02/2019	0,00	0,0064	-0,0137	-0,0351	-0,0037	-0,0095	-0,0359
12/02/2019	0,00	0,0085	-0,0077	-0,0270	0,0016	0,0068	-0,0250
13/02/2019	5,40	0,0067	-0,0066	-0,0221	0,0017	0,0000	-0,0247
14/02/2019	2,60	0,0054	-0,0058	-0,0155	0,0019	0,0007	-0,0192
15/02/2019	0,00	0,0067	-0,0057	-0,0182	0,0019	0,0004	-0,0207
16/02/2019	37,2	0,0043	-0,0023	-0,0297	0,0056	0,0053	-0,0093
17/02/2019	2,80	-0,0050	-0,0429	-0,2131	-0,0185	-0,0479	-0,1109
18/02/2019	0,20	-0,0048	-0,0563	-0,2367	-0,0394	-0,0674	-0,0909
19/02/2019	0,00	-0,0042	-0,0569	-0,1905	-0,0434	-0,0553	-0,0895
20/02/2019	0,00	-0,0023	-0,0483	-0,1455	-0,0282	-0,0359	-0,0595
21/02/2019	3,60	-0,0128	-0,0332	-0,1005	-0,0183	-0,0205	-0,0430
22/02/2019	0,20	-0,0029	-0,0254	-0,0721	-0,0106	-0,0116	-0,0318
23/02/2019	11,0	-0,0029	-0,0184	-0,0535	-0,0030	-0,0042	-0,0229
24/02/2019	4,40	-0,0026	-0,0153	-0,0507	-0,0017	-0,0017	-0,0210
25/02/2019	0,20	-0,0024	-0,0124	-0,0481	0,0005	0,0029	-0,0334
26/02/2019	57,2	-0,0392	-0,0893	-0,3075	-0,1056	-0,1001	-0,1132
27/02/2019	16,4	-0,1389	-0,3474	-0,9695	-0,4777	-0,3840	-0,4334
28/02/2019	7,80	-0,0611	-0,1334	-0,4234	-0,1935	-0,1255	-0,1536

Tabela 6. Densidade de fluxo média e precipitação para o ciclo da cultura do feijão.

(conclusão)

Data	Precipitação (mm)	Densidade de fluxo média (mm dia ⁻¹)					
		PC-Gramínea	PC-Leguminosa	PC-Pousio	PD-Gramínea	PD-Leguminosa	PD-Pousio
01/03/2019	22,3	-0,1835	-0,4098	-0,9295	-0,4526	-0,2832	-0,4624
02/03/2019	1,40	-0,1961	-0,3035	-0,7059	-0,4503	-0,2915	-0,4209
03/03/2019	17,0	-0,2189	-0,2386	-0,5721	-0,4717	-0,2954	-0,3942
04/03/2019	10,2	-0,2125	-0,1688	-0,4368	-0,2980	-0,1689	-0,2087
05/03/2019	0,00	-0,1135	-0,1093	-0,3052	-0,1489	-0,0926	-0,1361
06/03/2019	1,00	-0,1007	-0,0709	-0,2059	-0,0794	-0,0522	-0,0928
07/03/2019	0,00	-0,0655	-0,0462	-0,1418	-0,0459	-0,0208	-0,0555
08/03/2019	11,4	-0,0440	-0,0355	-0,1185	-0,0303	-0,0129	-0,0395
09/03/2019	0,00	-0,0341	-0,0314	-0,0983	-0,0236	-0,0116	-0,0243
10/03/2019	0,00	-0,0513	-0,0274	-0,0699	-0,0141	-0,0054	-0,0286
11/03/2019	0,00	-0,0857	-0,0249	-0,0480	-0,0090	-0,0023	-0,0261
12/03/2019	0,00	-0,0436	-0,0198	-0,0524	-0,0077	-0,0010	0,0009
13/03/2019	1,20	-0,0487	0,0004	-0,0483	0,0005	0,0057	0,0056
14/03/2019	12,6	-0,3710	-0,0127	-0,0318	0,0027	0,0076	0,0087
15/03/2019	0,00	-0,5979	-0,0056	-0,0259	0,0024	0,0053	0,0052
16/03/2019	0,00	-0,2433	-0,0047	-	0,0034	0,0058	-0,0084
17/03/2019	8,60	0,0055	-0,0044	-	0,0032	0,0038	-0,0073
18/03/2019	6,60	0,0051	-0,0037	-	0,0038	0,0042	-0,0062
19/03/2019	0,00	0,0035	-0,0031	-	0,0030	0,0028	-0,0045
20/03/2019	0,00	0,0018	-0,0018	-	0,0038	0,0039	-0,0027
21/03/2019	1,80	0,0027	-0,0325	-	0,0037	0,0037	-0,0027

Tabela 7. Densidade de fluxo média e precipitação para o ciclo da cultura do triticale.

(continua)

Data	Precipitação (mm)	Densidade de fluxo média (mm dia ⁻¹)					
		PC-Gramínea	PC-Leguminosa	PC-Pousio	PD-Gramínea	PD-Leguminosa	PD-Pousio
02/05/2019	0,00	-0,0016	-0,0489	-0,0262	-0,0116	-0,0075	-0,0121
03/05/2019	0,00	-0,0043	-0,0111	-0,0321	-0,0207	-0,0152	-0,0122
04/05/2019	0,00	-0,0035	-0,0099	-0,0116	-0,0188	-0,0060	-0,0119
05/05/2019	0,00	-0,0027	-0,0058	-0,0089	-0,0206	-0,0029	-0,0119
06/05/2019	0,00	-0,0013	-0,0040	-0,0562	-0,0169	-0,0008	-0,0093
07/05/2019	14,0	-0,0016	-0,0072	-0,0166	-0,0046	0,0010	-0,0149
08/05/2019	0,00	-0,0012	-0,0088	-0,0085	-0,0053	-0,0044	-0,0059
09/05/2019	0,00	-0,0006	-0,0053	-0,0071	-0,0043	-0,0031	-0,0040
10/05/2019	0,00	0,0000	-0,0043	-0,0055	-0,0030	-0,0022	-0,0026
11/05/2019	0,00	0,0004	-0,0062	0,0012	-0,0011	-0,0006	-0,0014
12/05/2019	0,00	0,0007	-0,0005	-0,0015	-0,0003	-0,0008	-0,0023
13/05/2019	0,00	0,0011	0,0025	0,0032	0,0016	-0,0004	-0,0006
14/05/2019	0,00	0,0013	0,0060	0,0041	0,0030	0,0032	0,0018
15/05/2019	0,00	0,0017	0,0057	0,0113	0,0039	0,0056	0,0024
16/05/2019	0,00	0,0021	0,0074	0,0119	0,0036	0,0068	0,0024
17/05/2019	0,00	0,0026	0,0108	0,0215	0,0067	0,0077	0,0054
18/05/2019	5,00	0,0030	0,0145	0,0248	0,0071	0,0111	0,0073
19/05/2019	0,60	0,0033	0,0163	0,0274	0,0075	0,0125	0,0079
20/05/2019	0,00	0,0038	0,0171	0,0333	0,0085	0,0109	0,0080
21/05/2019	0,00	0,0043	0,0206	0,0339	0,0094	0,0135	0,0079
22/05/2019	0,00	0,0049	0,0226	0,0380	0,0103	0,0144	0,0101
23/05/2019	0,00	0,0056	0,0253	0,0421	0,0111	0,0162	0,0070
24/05/2019	0,00	0,0062	0,0274	0,0434	0,0119	0,0157	0,0103
25/05/2019	0,00	0,0066	0,0292	0,0444	0,0117	0,0166	0,0107
26/05/2019	0,00	0,0069	0,0307	0,0430	0,0119	0,0156	0,0117
27/05/2019	0,00	0,0065	0,0307	0,0405	0,0119	0,0129	0,0127
28/05/2019	0,00	0,0067	0,0331	0,0402	0,0123	0,0131	0,0139
29/05/2019	14,4	0,0071	0,0357	0,0411	0,0124	0,0130	-0,0029
30/05/2019	0,00	0,0064	0,0354	0,0393	0,0119	0,0146	0,0128
31/05/2019	0,00	0,0054	0,0305	0,0359	0,0103	0,0130	0,0140
01/06/2019	0,00	0,0046	0,0265	0,0325	0,0089	0,0116	0,0150
02/06/2019	0,10	0,0046	0,0299	0,0326	0,0091	0,0136	0,0159
03/06/2019	2,00	0,0049	0,0280	0,0317	0,0083	0,0123	0,0156
04/06/2019	10,0	0,0043	0,0268	0,0314	0,0082	0,0131	0,0163
05/06/2019	0,00	0,0042	0,0256	0,0307	0,0078	0,0127	0,0155
06/06/2019	0,00	0,0028	0,0252	0,0288	0,0070	0,0121	0,0147
07/06/2019	0,00	0,0019	0,0230	0,0267	0,0060	0,0101	0,0137
08/06/2019	0,00	0,0016	0,0204	0,0248	0,0051	0,0089	0,0127
09/06/2019	0,00	0,0022	0,0163	0,0228	0,0045	0,0083	0,0115
10/06/2019	0,00	0,0025	0,0142	0,0194	0,0037	0,0092	0,0103
11/06/2019	0,00	0,0019	0,0114	0,0107	0,0023	0,0087	0,0058
12/06/2019	0,00	0,0019	0,0083	0,0110	0,0016	0,0176	0,0086
13/06/2019	0,00	0,0018	0,0068	0,0098	0,0010	0,0165	0,0082
14/06/2019	0,00	0,0029	0,0084	0,0081	0,0008	0,0158	0,0071
15/06/2019	0,00	0,0010	0,0066	0,0067	0,0006	0,0147	0,0061
16/06/2019	0,00	0,0011	0,0081	0,0051	0,0005	0,0120	0,0049
17/06/2019	0,00	0,0000	0,0082	0,0033	0,0002	0,0018	0,0038

Tabela 7. Densidade de fluxo média e precipitação para o ciclo da cultura do triticale.

(continua)

Data	Precipitação (mm)	Densidade de fluxo média (mm dia ⁻¹)					
		PC-Gramínea	PC-Leguminosa	PC-Pousio	PD-Gramínea	PD-Leguminosa	PD-Pousio
18/06/2019	0,00	0,0031	0,0075	0,0040	0,0001	0,0016	0,0033
19/06/2019	0,00	0,0025	0,0084	0,0024	0,0000	0,0018	0,0028
20/06/2019	0,00	0,0026	-	-	0,0000	0,0036	0,0029
21/06/2019	0,00	0,0020	-	-	0,0002	0,0025	0,0027
22/06/2019	0,00	0,0014	-	-	0,0001	0,0022	0,0024
23/06/2019	0,00	0,0013	-	-	-	0,0021	0,0025
24/06/2019	0,00	0,0012	-	-	-	-	0,0027
25/06/2019	0,00	0,0006	-	-	-	-	0,0052
26/06/2019	0,00	-0,0004	-	-	-	-	0,0000
27/06/2019	0,00	-0,0006	-	-	-	-	0,0013
28/06/2019	0,00	-0,0002	-	-	-	-	0,0015
29/06/2019	0,00	0,0001	-	-	-	-	0,0013
30/06/2019	0,00	0,0002	-	-	-	-	0,0011
01/07/2019	0,00	0,0004	-	-	-	-	0,0008
02/07/2019	0,00	0,0003	-	-	-	-	0,0010
03/07/2019	0,00	-	-	-	-	-	0,0011
04/07/2019	4,20	-	-	-	-	-	0,0015
05/07/2019	53,2	-	-	-	-	-	-0,0001
06/07/2019	0,20	-	-	-	-	-	-0,0001
07/07/2019	0,00	0,0014	-0,0018	-0,0045	0,0003	0,0000	-0,0054
08/07/2019	0,00	0,0005	0,0005	-0,0018	0,0004	0,0037	-0,0026
09/07/2019	0,00	0,0008	0,0004	-0,0015	0,0024	0,0041	-0,0017
10/07/2019	0,00	0,0011	0,0007	-0,0012	0,0075	0,0036	-0,0008
11/07/2019	0,00	-0,0002	0,0047	-0,0021	0,0056	0,0060	-0,0010
12/07/2019	0,00	0,0003	0,0024	-0,0023	0,0048	0,0057	-0,0012
13/07/2019	0,00	0,0010	0,0000	-0,0027	0,0046	0,0054	-0,0014
14/07/2019	0,00	0,0010	0,0001	-0,0025	0,0035	0,0045	0,0021
15/07/2019	0,00	0,0007	0,0002	-0,0002	0,0039	0,0022	0,0104
16/07/2019	3,20	0,0007	-0,0045	-0,0011	0,0031	0,0033	-0,0015
17/07/2019	0,00	0,0009	-0,0026	-0,0007	0,0028	-0,0021	-0,0015
18/07/2019	0,00	0,0015	0,0007	-0,0010	0,0026	-0,0033	-0,0024
19/07/2019	0,00	0,0012	0,0008	-0,0013	0,0019	-0,0061	-0,0030
20/07/2019	0,00	0,0011	0,0009	-0,0016	0,0018	-0,0082	-0,0036
21/07/2019	0,00	0,0003	-0,0028	-0,0054	0,0019	-0,0029	0,0008
22/07/2019	0,00	0,0004	0,0002	-0,0030	0,0031	0,0054	0,0022
23/07/2019	0,00	0,0008	0,0007	-0,0021	0,0021	0,0072	0,0026
24/07/2019	0,00	0,0011	0,0003	-0,0016	0,0017	0,0096	0,0022
25/07/2019	0,00	0,0015	0,0005	-0,0012	0,0014	0,0169	0,0018
26/07/2019	0,00	0,0018	0,0010	0,0015	0,0011	0,0168	0,0013
27/07/2019	0,00	0,0009	0,0013	0,0032	0,0010	0,0165	0,0009
28/07/2019	0,00	0,0002	0,0015	0,0060	0,0008	0,0168	0,0006
29/07/2019	0,00	0,0000	0,0031	0,0062	0,0002	0,0026	0,0015
30/07/2019	0,00	0,0000	0,0055	0,0083	0,0025	0,0031	0,0024
31/07/2019	3,70	0,0000	0,0082	0,0092	-0,0001	0,0034	0,0019
01/08/2019	0,00	0,0039	-0,0053	0,0020	0,0010	0,0000	0,0014

Tabela 7. Densidade de fluxo média e precipitação para o ciclo da cultura do triticale.

(conclusão)

Data	Precipitação (mm)	Densidade de fluxo média (mm dia ⁻¹)					
		PC-Gramínea	PC-Leguminosa	PC-Pousio	PD-Gramínea	PD-Leguminosa	PD-Pousio
02/08/2019	0,00	0,0034	0,0013	0,0011	0,0009	-0,0006	0,0009
03/08/2019	2,40	0,0031	0,0023	0,0002	0,0008	-0,0027	0,0004
04/08/2019	0,00	0,0036	0,0031	0,0008	-0,0001	-0,0024	0,0004
05/08/2019	2,30	0,0043	0,0041	0,0012	0,0000	-0,0017	0,0005
06/08/2019	0,00	0,0063	0,0057	-0,0006	-0,0001	-0,0006	0,0000
07/08/2019	0,00	0,0052	0,0080	-0,0001	0,0001	0,0032	0,0003
08/08/2019	0,00	0,0054	0,0070	-0,0032	-	-	0,0003
09/08/2019	0,00	0,0057	-	-0,0058	-	-	0,0002
10/08/2019	0,00	-	-	0,0152	-	-	0,0001
11/08/2019	0,00	-	-	0,0236	-	-	0,0000
12/08/2019	0,00	-	-	0,0147	-	-	0,0002
13/08/2019	0,00	-	-	0,0052	-	-	0,0002
14/08/2019	0,00	-	-	-	-	-	-
15/08/2019	0,00	-	-	-	-	-	-
16/08/2019	0,00	-	-	-	-	-	-
17/08/2019	0,00	-	-	-	-	-	-
18/08/2019	0,00	-	-	-	-	-	-
19/08/2019	0,00	-	-	-	-	-	-
20/08/2019	0,00	-	-	-	-	-	-
21/08/2019	0,00	-	-	-	-	-	-
22/08/2019	0,00	-	-	-	-	-	-
23/08/2019	0,00	-	-	-	-	-	-
24/08/2019	0,00	-	-	-	-	-	-
25/08/2019	0,00	-	-	-	-	-	-
26/08/2019	0,00	-	-	-	-	-	-
27/08/2019	0,00	-	-	-	-	-	-
28/08/2019	0,00	-	-	-	-	-	-
29/08/2019	0,00	-	-	-	-	-	-

APÊNDICE F. Propriedades físicas do solo.

Tabela 8. Média da densidade do solo (kg m^{-3}) das camadas de solo dos tratamentos experimentais em cada ciclo avaliado.

Tratamentos	Plantas de Cobertura	Feijão	Triticale
		0,00-0,05 m	
PC-Gramínea	1253,91	1145,68	1152,59
PC-Leguminosa	1189,50	1201,45	1142,44
PC-Pousio	1183,68	1209,29	1224,58
PD-Gramínea	1263,33	1205,49	1210,39
PD-Leguminosa	1205,76	1152,60	1274,69
PD-Pousio	1289,63	1276,18	1273,92
		0,05-0,10 m	
PC-Gramínea	1292,18	1247,47	1219,91
PC-Leguminosa	1217,22	1355,83	1304,74
PC-Pousio	1277,21	1290,80	1286,06
PD-Gramínea	1319,02	1263,90	1231,72
PD-Leguminosa	1312,00	1231,63	1350,96
PD-Pousio	1341,46	1232,17	1152,82
		0,10-0,20 m	
PC-Gramínea	1366,39	1243,64	1263,38
PC-Leguminosa	1353,17	1380,91	1320,83
PC-Pousio	1274,23	1356,14	1304,95
PD-Gramínea	1314,77	1235,89	1278,51
PD-Leguminosa	1243,22	1304,70	1329,40
PD-Pousio	1378,53	1190,60	1232,98
		0,20-0,30 m	
PC-Gramínea	1342,29	1252,06	1197,00
PC-Leguminosa	1293,79	1338,90	1315,49
PC-Pousio	1271,34	1230,71	1270,74
PD-Gramínea	1329,75	1250,63	1227,99
PD-Leguminosa	1291,32	1198,75	1148,11
PD-Pousio	1298,59	1282,93	1185,82

Tabela 9. Média da porosidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) das camadas de solo dos tratamentos experimentais em cada ciclo avaliado.

Tratamentos	Plantas de Cobertura	Feijão	Triticale
		0,00-0,05 m	
PC-Gramínea	0,57	0,61	0,61
PC-Leguminosa	0,60	0,59	0,61
PC-Pousio	0,60	0,59	0,58
PD-Gramínea	0,57	0,59	0,59
PD-Leguminosa	0,59	0,61	0,57
PD-Pousio	0,56	0,57	0,57
		0,05-0,10 m	
PC-Gramínea	0,56	0,58	0,58
PC-Leguminosa	0,59	0,54	0,56
PC-Pousio	0,57	0,56	0,56
PD-Gramínea	0,55	0,57	0,58
PD-Leguminosa	0,55	0,58	0,54
PD-Pousio	0,54	0,58	0,61
		0,10-0,20 m	
PC-Gramínea	0,54	0,58	0,57
PC-Leguminosa	0,54	0,53	0,55
PC-Pousio	0,57	0,54	0,56
PD-Gramínea	0,55	0,58	0,57
PD-Leguminosa	0,58	0,56	0,55
PD-Pousio	0,53	0,60	0,58
		0,20-0,30 m	
PC-Gramínea	0,55	0,58	0,60
PC-Leguminosa	0,56	0,55	0,56
PC-Pousio	0,57	0,58	0,57
PD-Gramínea	0,55	0,58	0,57
PD-Leguminosa	0,56	0,60	0,61
PD-Pousio	0,56	0,57	0,60

Tabela 10. Média da microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) das camadas de solo dos tratamentos experimentais em cada ciclo avaliado.

Tratamentos	Plantas de Cobertura	Feijão	Triticale
		0,00-0,05 m	
PC-Gramínea	0,41	0,38	0,38
PC-Leguminosa	0,37	0,37	0,35
PC-Pousio	0,37	0,36	0,38
PD-Gramínea	0,43	0,39	0,39
PD-Leguminosa	0,34	0,36	0,40
PD-Pousio	0,39	0,37	0,38
		0,05-0,10 m	
PC-Gramínea	0,37	0,38	0,38
PC-Leguminosa	0,29	0,38	0,36
PC-Pousio	0,38	0,37	0,38
PD-Gramínea	0,36	0,37	0,36
PD-Leguminosa	0,36	0,37	0,39
PD-Pousio	0,40	0,36	0,36
		0,10-0,20 m	
PC-Gramínea	0,41	0,38	0,40
PC-Leguminosa	0,41	0,41	0,39
PC-Pousio	0,40	0,39	0,38
PD-Gramínea	0,39	0,38	0,39
PD-Leguminosa	0,33	0,41	0,39
PD-Pousio	0,43	0,35	0,39
		0,20-0,30 m	
PC-Gramínea	0,37	0,38	0,38
PC-Leguminosa	0,38	0,39	0,39
PC-Pousio	0,37	0,36	0,39
PD-Gramínea	0,38	0,37	0,42
PD-Leguminosa	0,35	0,37	0,37
PD-Pousio	0,39	0,38	0,39

Tabela 11. Média da macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) das camadas de solo dos tratamentos experimentais em cada ciclo avaliado.

Tratamentos	Plantas de Cobertura	Feijão	Triticale
		0,00-0,05 m	
PC-Gramínea	0,17	0,23	0,23
PC-Leguminosa	0,23	0,22	0,26
PC-Pousio	0,23	0,23	0,21
PD-Gramínea	0,14	0,20	0,20
PD-Leguminosa	0,25	0,24	0,16
PD-Pousio	0,17	0,20	0,19
		0,05-0,10 m	
PC-Gramínea	0,19	0,20	0,20
PC-Leguminosa	0,29	0,16	0,19
PC-Pousio	0,18	0,19	0,18
PD-Gramínea	0,19	0,20	0,22
PD-Leguminosa	0,19	0,21	0,15
PD-Pousio	0,14	0,22	0,24
		0,10-0,20 m	
PC-Gramínea	0,13	0,20	0,17
PC-Leguminosa	0,13	0,12	0,16
PC-Pousio	0,17	0,15	0,18
PD-Gramínea	0,16	0,21	0,18
PD-Leguminosa	0,25	0,15	0,16
PD-Pousio	0,11	0,25	0,19
		0,20-0,30 m	
PC-Gramínea	0,17	0,19	0,22
PC-Leguminosa	0,18	0,16	0,17
PC-Pousio	0,20	0,22	0,18
PD-Gramínea	0,17	0,21	0,15
PD-Leguminosa	0,21	0,23	0,24
PD-Pousio	0,17	0,19	0,21

Tabela 12. Média da resistência do solo à penetração (MPa) das camadas de solo dos tratamentos experimentais em cada ciclo avaliado.

Tratamentos	Plantas de Cobertura	Feijão	Triticale
		0,00-0,05 m	
PC-Gramínea	0,71	0,64	0,65
PC-Leguminosa	0,69	0,70	0,63
PC-Pousio	0,39	0,70	0,73
PD-Gramínea	0,78	0,71	0,72
PD-Leguminosa	0,66	0,64	0,80
PD-Pousio	0,89	0,72	0,75
		0,05-0,10 m	
PC-Gramínea	0,91	0,75	0,72
PC-Leguminosa	0,71	0,88	0,81
PC-Pousio	0,20	0,80	0,80
PD-Gramínea	0,84	0,77	0,73
PD-Leguminosa	0,82	0,73	0,89
PD-Pousio	0,80	0,71	0,71
		0,10-0,20 m	
PC-Gramínea	0,87	0,75	0,78
PC-Leguminosa	0,89	0,88	0,84
PC-Pousio	0,50	0,89	0,82
PD-Gramínea	0,84	0,74	0,79
PD-Leguminosa	0,73	0,83	0,86
PD-Pousio	0,94	0,68	0,74
		0,20-0,30 m	
PC-Gramínea	0,70	0,75	0,70
PC-Leguminosa	0,81	0,86	0,83
PC-Pousio	0,47	0,73	0,79
PD-Gramínea	0,85	0,75	0,81
PD-Leguminosa	0,80	0,70	0,64
PD-Pousio	0,82	0,80	0,69

APÊNDICE G. Teste F e coeficiente de variação para os atributos físicos do solo.

Tabela 13. Teste F e coeficiente de variação (CV) para avaliar o efeito do preparo do solo e das coberturas na densidade do solo, porosidade, macroporosidade, microporosidade e resistência do solo à penetração ao final do ciclo das plantas de cobertura.

Causas da variação	Camadas (m)			
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
Densidade do solo				
Preparo	2,58 ^{ns}	0,96 ^{ns}	0,88 ^{ns}	0,08 ^{ns}
Bloco	0,46 ^{ns}	0,33 ^{ns}	2,74 ^{ns}	14,87 ^{ns}
Cobertura	0,94 ^{ns}	0,28 ^{ns}	2,10 ^{ns}	0,62 ^{ns}
Preparo x Cobertura	1,28 ^{ns}	0,37 ^{ns}	2,93 ^{ns}	0,09 ^{ns}
CV1%	6,78	7,02	7,91	2,38
CV2%	7,70	7,47	3,68	6,56
Porosidade				
Preparo	2,70 ^{ns}	0,77 ^{ns}	0,81 ^{ns}	0,06 ^{ns}
Bloco	0,51 ^{ns}	0,20 ^{ns}	2,84 ^{ns}	18,25*
Cobertura	0,93 ^{ns}	0,28 ^{ns}	2,89 ^{ns}	0,82 ^{ns}
Preparo x Cobertura	1,13 ^{ns}	0,24 ^{ns}	2,38 ^{ns}	0,11 ^{ns}
CV1%	4,96	5,23	6,10	1,68
CV2%	5,97	5,55	2,87	5,17
Macroporosidade				
Preparo	33,33*	10,31*	3,92 ^{ns}	0,00 ^{ns}
Bloco	0,04 ^{ns}	7,73 ^{ns}	3,42 ^{ns}	25,57*
Cobertura	2,11 ^{ns}	1,98 ^{ns}	2,63 ^{ns}	0,15 ^{ns}
Preparo x Cobertura	1,03 ^{ns}	1,46 ^{ns}	5,20*	0,32 ^{ns}
CV1%	6,37	10,11	31,81	5,78
CV2%	39,14	26,69	18,14	36,46
Microporosidade				
Preparo	0,56 ^{ns}	1,84 ^{ns}	8,10 ^{ns}	0,08 ^{ns}
Bloco	0,53 ^{ns}	2,84 ^{ns}	3,36 ^{ns}	1,00 ^{ns}
Cobertura	3,28*	1,56 ^{ns}	3,63 ^{ns}	0,11 ^{ns}
Preparo x Cobertura	1,00 ^{ns}	0,87 ^{ns}	5,60 ^{ns}	0,46 ^{ns}
CV1%	7,33	9,15	6,39	4,39
CV2%	11,44	16,46	5,00	12,24
Resistência do solo à penetração				
Preparo	5,20 ^{ns}	10,51*	0,01 ^{ns}	46,25*
Bloco	0,21 ^{ns}	0,23 ^{ns}	2,44 ^{ns}	39,42*
Cobertura	2,95 ^{ns}	4,07*	1,57 ^{ns}	0,91 ^{ns}
Preparo x Cobertura	9,99*	2,26 ^{ns}	18,99*	2,26 ^{ns}
CV1%	13,39	6,42	15,20	3,14
CV2%	9,03	11,44	5,96	8,30

ns não significativo; *significativo a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Tabela 14. Teste F e coeficiente de variação (CV) para avaliar o efeito do preparo do solo e das coberturas na densidade do solo, porosidade, macroporosidade, microporosidade e resistência do solo à penetração ao final do ciclo da cultura do feijão.

Causas da variação	Camadas (m)			
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
Densidade do solo				
Preparo	0,31 ^{ns}	70,47*	11,73*	0,63 ^{ns}
Bloco	3,23 ^{ns}	20,97*	0,07 ^{ns}	0,59 ^{ns}
Cobertura	1,03 ^{ns}	0,39 ^{ns}	2,72 ^{ns}	0,08 ^{ns}
Preparo x Cobertura	0,34 ^{ns}	0,99 ^{ns}	1,45 ^{ns}	2,37 ^{ns}
CV1%	6,79	1,19	4,24	6,33
CV2%	6,05	6,91	5,69	6,27
Porosidade				
Preparo	0,00 ^{ns}	108,00*	13,80*	0,81 ^{ns}
Bloco	1,04 ^{ns}	30,33*	0,06 ^{ns}	0,52 ^{ns}
Cobertura	0,54 ^{ns}	0,31 ^{ns}	2,66 ^{ns}	0,05 ^{ns}
Preparo x Cobertura	0,70 ^{ns}	0,93 ^{ns}	1,15 ^{ns}	2,22 ^{ns}
CV1%	6,72	0,72	2,92	4,57
CV2%	4,61	5,34	4,51	4,96
Macroporosidade				
Preparo	0,01 ^{ns}	27,04*	5,58 ^{ns}	0,21 ^{ns}
Bloco	0,62 ^{ns}	23,56*	0,22 ^{ns}	0,55 ^{ns}
Cobertura	0,26 ^{ns}	0,48 ^{ns}	2,14 ^{ns}	0,08 ^{ns}
Preparo x Cobertura	0,67 ^{ns}	0,49 ^{ns}	0,71 ^{ns}	2,20 ^{ns}
CV1%	27,19	6,06	22,64	25,24
CV2%	17,57	24,33	33,94	21,82
Microporosidade				
Preparo	0,22 ^{ns}	4,92 ^{ns}	1,62 ^{ns}	0,31 ^{ns}
Bloco	0,32 ^{ns}	13,00*	1,00 ^{ns}	0,33 ^{ns}
Cobertura	3,67*	0,52 ^{ns}	1,43 ^{ns}	0,39 ^{ns}
Preparo x Cobertura	0,09 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,27 ^{ns}	1,68 ^{ns}
CV1%	6,77	2,28	6,74	6,83
CV2%	4,17	5,73	11,23	6,08
Resistência do solo à penetração				
Preparo	0,02 ^{ns}	25,00*	2,32 ^{ns}	0,49 ^{ns}
Bloco	0,82 ^{ns}	10,37*	1,10 ^{ns}	0,49 ^{ns}
Cobertura	0,23 ^{ns}	0,43 ^{ns}	3,55*	0,09 ^{ns}
Preparo x Cobertura	0,63 ^{ns}	0,73 ^{ns}	0,60 ^{ns}	2,31 ^{ns}
CV1%	19,24	3,94	12,30	13,99
CV2%	13,56	14,69	11,11	12,54

ns não significativo; *significativo a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Tabela 15. Teste F e coeficiente de variação (CV) para avaliar o efeito do preparo do solo e das coberturas na densidade do solo, porosidade, macroporosidade, microporosidade e resistência do solo à penetração ao final do ciclo da cultura do triticale.

Causas da variação	Camadas (m)			
	0,00,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
Densidade do solo				
Preparo	3,16 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,45 ^{ns}	3,52 ^{ns}
Bloco	0,01 ^{ns}	0,30 ^{ns}	0,49 ^{ns}	0,97 ^{ns}
Cobertura	0,41 ^{ns}	2,39 ^{ns}	0,88 ^{ns}	0,03 ^{ns}
Preparo x Cobertura	0,49 ^{ns}	0,79 ^{ns}	0,51 ^{ns}	4,67*
CV1%	6,89	12,29	3,95	5,24
CV2%	8,35	6,67	6,45	5,81
Porosidade				
Preparo	4,00 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,89 ^{ns}	1,53 ^{ns}
Bloco	0,11 ^{ns}	0,40 ^{ns}	1,00 ^{ns}	0,88 ^{ns}
Cobertura	0,41 ^{ns}	2,52 ^{ns}	0,76 ^{ns}	0,09 ^{ns}
Preparo x Cobertura	0,41 ^{ns}	0,76 ^{ns}	0,57 ^{ns}	4,55*
CV1%	4,40	9,11	2,21	4,91
CV2%	6,00	4,96	5,29	4,12
Macroporosidade				
Preparo	3,81 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,15 ^{ns}	27,00*
Bloco	0,07 ^{ns}	0,07 ^{ns}	2,17 ^{ns}	2,33 ^{ns}
Cobertura	0,10 ^{ns}	1,78 ^{ns}	0,32 ^{ns}	0,45 ^{ns}
Preparo x Cobertura	1,09 ^{ns}	1,72 ^{ns}	0,05 ^{ns}	3,83*
CV1%	22,60	40,96	14,20	2,10
CV2%	26,58	21,59	27,23	23,60
Microporosidade				
Preparo	9,76*	0,11 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,12 ^{ns}
Bloco	1,16 ^{ns}	0,08 ^{ns}	25,00*	1,77 ^{ns}
Cobertura	0,06 ^{ns}	0,47 ^{ns}	0,11 ^{ns}	1,31 ^{ns}
Preparo x Cobertura	1,55 ^{ns}	4,19*	0,21 ^{ns}	1,77 ^{ns}
CV1%	3,77	7,68	1,21	5,22
CV2%	6,47	4,79	8,07	6,99
Resistência do solo à penetração				
Preparo	3,20 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,08 ^{ns}	4,24 ^{ns}
Bloco	0,01 ^{ns}	0,26 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,77 ^{ns}
Cobertura	0,34 ^{ns}	2,14 ^{ns}	1,17 ^{ns}	0,06 ^{ns}
Preparo x Cobertura	0,61 ^{ns}	0,91 ^{ns}	0,52 ^{ns}	4,69*
CV1%	14,21	25,98	8,35	8,32
CV2%	16,93	14,58	12,53	11,88

ns não significativo; *significativo a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.

APÊNDICE H. Teste F e coeficiente de variação para os dados do balanço de água no solo.

Tabela 16. Teste F e coeficiente de variação (CV) para avaliar o efeito do preparo do solo e das coberturas nos valores totais da drenagem interna/ascensão capilar (D/AC), variação da armazenagem de água no solo (Δh), evapotranspiração (ET_r) e eficiência de uso da água (EUA) para o ciclo das plantas de cobertura, cultura do feijão e do triticale.

Causas da variação	AC/D	Δh	ET_r	EUA
Plantas de Cobertura				
Preparo	0,11 ^{ns}	4,54 ^{ns}	97,46*	-
Bloco	0,87 ^{ns}	6,15 ^{ns}	172,29*	-
Cobertura	5,67*	11,10*	15,02*	-
Preparo x Cobertura	2,17*	0,69 ^{ns}	2,37 ^{ns}	-
CV1%	59,89	45,67	1,16	-
CV2%	45,51	28,82	4,23	-
Feijão				
Preparo	0,62 ^{ns}	7,36 ^{ns}	6,05 ^{ns}	0,42 ^{ns}
Bloco	0,19 ^{ns}	2,43 ^{ns}	1,81 ^{ns}	0,16 ^{ns}
Cobertura	5,56*	0,72 ^{ns}	0,95 ^{ns}	0,60 ^{ns}
Preparo x Cobertura	3,60*	0,53 ^{ns}	0,28 ^{ns}	0,73 ^{ns}
CV1%	56,02	40,77	3,51	20,94
CV2%	46,42	60,95	4,47	37,02
Triticale				
Preparo	4,34 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,06 ^{ns}
Bloco	0,68 ^{ns}	1,91 ^{ns}	1,91 ^{ns}	0,05 ^{ns}
Cobertura	6,59*	0,77 ^{ns}	0,79 ^{ns}	0,23 ^{ns}
Preparo x Cobertura	3,06 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,03 ^{ns}
CV1%	51,28	8,50	3,31	22,75
CV2%	46,57	19,12	7,52	24,63

ns não significativo; *significativo a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.

APÊNDICE I. Teste F e coeficiente de variação para os dados de massa seca das plantas de cobertura e componentes de rendimento das culturas do feijão e do triticale.

Tabela 17. Teste F e coeficiente de variação (CV) para avaliar o efeito do preparo do solo e das coberturas na produção de massa seca das plantas de cobertura.

Causas da variação	Massa seca plantas de cobertura
Preparo	1,07 ^{ns}
Bloco	3,01 ^{ns}
Cobertura	0,05 ^{ns}
Preparo x Cobertura	0,28 ^{ns}
CV1%	18,45
CV2%	21,09

Tabela 18. Teste F e coeficiente de variação (CV) para avaliar o efeito do preparo do solo e das coberturas nos componentes de rendimento da cultura do feijão.

Causas da variação	Número de plantas	Número de vagens	Produtividade
Preparo	6,04 ^{ns}	495,64*	0,85 ^{ns}
Bloco	1,29 ^{ns}	278,03*	0,06 ^{ns}
Cobertura	2,29 ^{ns}	4,34*	0,48 ^{ns}
Preparo x Cobertura	2,17 ^{ns}	0,59 ^{ns}	0,61 ^{ns}
CV1%	32,53	1,64	24,44
CV2%	25,35	18,83	38,80

Tabela 19. Teste F e coeficiente de variação (CV) para avaliar o efeito do preparo do solo e das coberturas nos componentes de rendimento da cultura do triticale.

Causas da variação	Número de plantas	Produtividade
Preparo	10,34*	1,29 ^{ns}
Bloco	0,10 ^{ns}	0,81 ^{ns}
Cobertura	5,95 ^{ns}	2,19 ^{ns}
Preparo x Cobertura	4,52 ^{ns}	1,94 ^{ns}
CV1%	8,60	13,06
CV2%	7,80	20,20