

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

Micael Stolben Mallmann

**INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO CONDICIONADA PELO
USO DE PLANTAS DE COBERTURA**

Santa Maria, RS, Brasil
2017

PPGCS/UFSM, RS

MALLMANN, Micael Stolzen

Mestre 2017

Micael Stolben Mallmann

**INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO CONDICIONADA PELO USO DE
PLANTAS DE COBERTURA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

Orientador: Profº Dr. Dalvan José Reinert

Santa Maria, RS
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Mallmann, Micael Stolben

Infiltração de água no solo condicionada pelo uso de plantas de cobertura / Micael Stolben Mallmann.- 2017.
72 p.; 30 cm

Orientador: Dalvan José Reinert
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, RS, 2017

1. Infiltariação de água no solo 2. Plantas de cobertura
3. Propriedades do solo I. Reinert, Dalvan José II.
Título.

© 2017

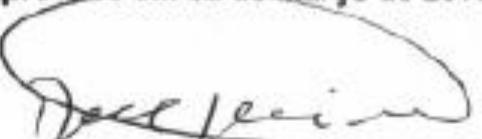
Todos os direitos autorais reservados a Micael Stolben Mallmann. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.
Endereço: Universidade Federal de Santa Maria - Centro de Ciências Rurais - Departamento de Solos, Av. Roraima, n. 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria, RS, CEP. 97105-900. E-mail: micaelstolben@gmail.com

Micael Stolben Mallmann

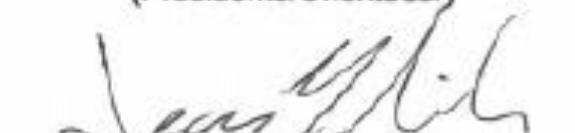
**INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO CONDICIONADA PELO USO
DE PLANTAS DE COBERTURA**

Dissertação apresentada ao Curso de
Pós-Graduação em Ciência do Solo
da Universidade Federal de Santa
Maria (UFSM, RS), como requisito
parcial para a obtenção do título de
Mestre em Ciência do Solo.

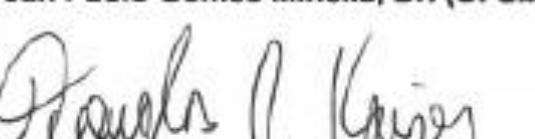
Aprovado em 02 de março de 2017:



Dalvan José Reinert, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Jean Paolo Gomes Minella, Dr. (UFSM)



Douglas Rodrigo Kaiser, Dr. (UFFS)

Santa Maria, RS
2017

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, aos meus pais Miguel L. Mallmann e Elaine A. Stolben pelo exemplo de luta, trabalho e dedicação para educar seus filhos e pelo apoio incondicional na busca de meus sonhos e vontades.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e à CAPES por ter possibilitado a realização do curso de pós-graduação.

Ao orientador, professor Dalvan J. Reinert, pelos ensinamentos, amizade, paciência e auxílio durante o período do mestrado.

À minha mãe, Elaine A. Stolben, por ter me ensinado que o conhecimento é algo que ninguém nos tira e me apoiado a seguir a carreira acadêmica.

A meu pai, Miguel L. Mallmann, exemplo de caráter, honestidade e dedicação e me mostrar a não desistir do que queremos quando tiver dificuldades.

Ao irmão, Henrique S. Mallmann, que mesmo distante, sempre me inspirou pela busca de alcançar a pós-graduação.

À namorada, amiga e companheira, Cristiane H. da Silva, por ter me motivado em todos os momentos de dificuldades e desânimo e dividido seus momentos comigo.

Ao meu grande amigo e segundo pai, “Lima”, por dividir seu espaço comigo e pelas noites de conversa e conselhos, que sempre serão lembrados.

Aos colegas de pós-graduação, especialmente Elói Paulus, Fabio J. A. Schneider, Dinis Deuschle, Rafael Ramon, Alan Carlos Batistão, Ezequiel Koppe e demais que participaram de alguma maneira para a realização deste trabalho.

Aos alunos de iniciação científica Felipe D. Bertol e Wiilliam S. Foggiato pela ajuda em todas as etapas deste trabalho.

Muito obrigado a todos!

RESUMO

INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO CONDICIONADAS PELO USO DE PLANTAS DE COBERTURA

O AUTOR: Micael Stolben Mallmann

ORIENTADOR: Dalvan José Reinert

A inclusão de plantas de cobertura em sistemas de produção agrícola tem recebido atenção pela habilidade de melhorar a multifuncionalidade do solo. Com vistas a melhoria da estrutura do solo e de propriedades físico-hídricas do solo, principalmente da infiltração de água no solo, objetivou-se com este trabalho: (a) avaliar o efeito de diferentes espécies de plantas de cobertura de inverno em propriedades físico-hídricas do solo e (b) verificar a relação entre métodos pontuais de avaliação da infiltração de água no solo com a infiltração de água com chuva natural em escala de parcela. Para o primeiro estudo os sistemas estudados foram: consociação de aveia e ervilhaca (AE), consociação de aveia e nabo (AN), vegetação espontânea (VE) e solo desnudo (SD). Amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas nas camadas de 0 - 0,05; 0,05 - 0,1; 0,1 - 0,2; 0,2 - 0,3 m para avaliações da densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) e permeabilidade ao ar (K_a). Avaliou-se também a agregação do solo nas camadas de 0 - 0,05 e 0,5 - 0,1 m. A infiltração de água no solo foi determinada pelo método de duplo anel concêntrico. Para o segundo estudo foram utilizados três tratamentos do primeiro estudo para determinação da taxa de infiltração estável de água no solo (TIE) pelos métodos do infiltrômetro de Cornell, duplo anel concêntrico e a infiltração em eventos de chuva natural. Os resultados indicam que após um cultivo de plantas de cobertura de inverno ainda não são observadas alterações nas propriedades físicas avaliadas, porém há indícios de melhoria da infiltração de água no solo e na continuidade e diâmetro de poros nos tratamentos com plantas de cobertura. A TIE determinada pelo método de duplo anel concêntrico e infiltrômetro de Cornell é superestimada de 1,8 a 2,2 vezes em relação a determinada com chuva natural.

Palavras-chave: Propriedades físico-hídricas. Plantas de cobertura. Chuva natural.

ABSTRACT

WATER INFILTRATION IN SOIL CONDITIONED BY THE USE OF COVER CROPS

AUTHOR: MICAEL STOLBEN MALLMANN

ADVISOR: DALVAN JOSÉ REINERT

The inclusion of cover crops in agricultural production systems has received attention for the ability to improve the multifunctionality of the soil. In order to improve soil structure and soil physical-hydric properties, especially soil water infiltration, the objective of this study was: (a) to evaluate the effect of different species of winter cover crops on soil physical properties and (b) to verify the relationship between punctual methods for the evaluation of water infiltration in the soil and the infiltration of water with natural rainfall on plot scale. For the first study the systems studied were: oat and vetch (AE) consortium, oat and turnip (AN), spontaneous vegetation (VE) and bare soil (SD). Soil samples with undisturbed structure were collected in the layers of 0 - 0,05; 0,05 - 0,1; 0,1 - 0,2 and 0,2 - 0,3 m to measure bulk density (DS), total porosity (Pt), macroporosity (Mac), microporosity (Mic), saturated soil hydraulic conductivity (Ksat) and permeability to air (Ka). Soil aggregation was also evaluated in the layers of 0 - 0,05 and 0,5 - 0,1 m. Soil water infiltration was determined by the concentric double ring method. For the second study, three treatments were used in the first study to determine the rate of stable infiltration of soil water (TIE) by the Cornell infiltrometer, double ring infiltrometer and infiltration in natural rainfall events. The results indicate that after the cultivation of winter cover crops, there are no changes in the physical properties evaluated, but there is evidence of improved water infiltration in the soil and the continuity and pore diameter in the treatments with cover crops. The TIE determined by the Cornell infiltrometer and double ring infiltrometer method is overestimated from 1.8 to 2.2 times that of natural rainfall.

Keywords: Physical-hydric properties. Cover crops. Natural rainfall.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Impactos de plantas de cobertura nas funções do solo. | 14 |
| Figura 2 - Perfis de solo para cada bloco do local do experimento. Santa Maria, RS. | 21 |
| Figura 3 - Vista parcial das parcelas cultivadas com plantas de cobertura (A) e do experimento (B). | 22 |
| Figura 4 - Infiltrômetro de duplo anel concêntrico utilizado para a determinação da infiltração de água no solo. | 29 |
| Figura 5 - Infiltrômetro de Cornell utilizado para avaliação da Infiltração de água no solo. | 32 |
| Figura 6 - Relação entre permeabilidade ao ar e espaço aéreo para os tratamentos nas duas datas avaliadas. Data 1 (A) e data 2 (B). | 42 |
| Figura 7 - Relação entre permeabilidade ao ar e espaço aéreo para manejos de cobertura do solo. | 44 |
| Figura 8 - Diâmetro médio geométrico de agregados em sistemas de manejo cobertura do solo na primeira data de avaliação (A) e na segunda data de avaliação (B). Santa Maria, 2016. | 46 |
| Figura 9 - Diâmetro médio ponderado de agregados em sistemas de manejo cobertura do solo na primeira data de avaliação (A) e na segunda data de avaliação (B). Santa Maria, 2016. | 47 |
| Figura 10 - Produção de massa úmida e massa seca de diferentes plantas de cobertura do solo. Santa Maria, RS. | 48 |
| Figura 11 - Relação entre massa seca produzida por plantas de cobertura e infiltração de água no solo. Santa Maria, RS. | 49 |
| Figura 12 - Taxa de infiltração de água no solo em sistemas de manejo cobertura do solo para diferentes datas de avaliação. Santa Maria, RS. | 50 |
| Figura 13 - Taxa de infiltração de água no solo em sistemas de manejo cobertura do solo para as duas datas avaliadas. Santa Maria, RS. | 51 |
| Figura 14 - Infiltração acumulada com chuva natural. Santa Maria, RS. | 54 |
| Figura 15 - Infiltração de água determinada pelo método do duplo anel. Santa Maria, RS. | 55 |
| Figura 16 - Infiltração de água no solo determinada pelo método de Cornell. Santa Maria, RS. | 55 |
| Figura 17 - Precipitação para quatro eventos de chuva monitorados. Santa Maria, RS. | 57 |
| Figura 18 - Escoamento estimado e observado para o evento do dia 10/07/2016 para os tratamentos solo desnudo (A), aveia e ervilhaca (B) e vegetação espontânea (C). | 58 |
| Figura 19 - Escoamento estimado e observado para o evento do dia 17/10/2016 para os tratamentos solo desnudo (A), aveia e ervilhaca (B) e vegetação espontânea (C). | 60 |
| Figura 20 - Escoamento estimado e observado para o evento do dia 18/10/2016 para os tratamentos solo desnudo (A), aveia e ervilhaca (B) e vegetação espontânea (C). | 62 |
| Figura 21 - Escoamento estimado e observado para o evento do dia 31/10/2016 para os tratamentos solo desnudo (A), aveia e ervilhaca (B) e vegetação espontânea (C). | 64 |

Figura 22 - Relação entre o escoamento estimado e o escoamento observado para os três métodos de avaliação da taxa de infiltração estável de água no solo.....65

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1- Composição granulométrica do perfil de solo do local do experimento. Santa Maria, RS..... | 21 |
| Tabela 2 - Densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$) em manejos de cobertura do solo em um Argissolo Vermelho, Santa Maria, RS. | 35 |
| Tabela 3 - Porosidade total do solo ($m^3\ m^{-3}$) em manejos de cobertura do solo, Santa Maria, RS..... | 36 |
| Tabela 4 - Microporosidade do solo ($m^3\ m^{-3}$) em manejos de cobertura do solo, Santa Maria, RS. | 37 |
| Tabela 5 - Macroporosidade do solo ($m^3\ m^{-3}$) em manejos de cobertura do solo, Santa Maria, RS. | 38 |
| Tabela 6 - Condutividade hidráulica do solo saturado ($mm\ h^{-1}$) em manejos de cobertura do solo, Santa Maria, RS..... | 40 |
| Tabela 7 - Coeficientes de desempenho dos métodos utilizados de determinação da TIE para a estimativa do escoamento superficial de água..... | 66 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 11 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 13 |
| 2.1 | PLANTAS DE COBERTURA E PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO | 13 |
| 2.5.2 | Plantas de cobertura: potencialidades e limitações | 13 |
| 2.1.2 | Plantas de cobertura e alterações em propriedades físico-hídricas do solo | 15 |
| 2.2 | MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO | 18 |
| 3 | MATERIAL E MÉTODOS..... | 20 |
| 3.1 | LOCAL E SOLO..... | 20 |
| 3.2 | DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS..... | 22 |
| 3.3 | CULTURAS E TRATOS CULTURAIS | 23 |
| 3.4 | ESTUDO 1: ALTERAÇÕES EM PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS COM A UTILIZAÇÃO DE PLANTAS DE COBERTURA DO SOLO A CURTO PRAZO | 24 |
| 3.4.1 | Densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade | 24 |
| 3.4.2 | Fluxo de ar e cálculo da permeabilidade ao ar..... | 25 |
| 3.4.3 | Condutividade hidráulica do solo saturado | 26 |
| 3.4.4 | Avaliação da distribuição do tamanho de agregados estáveis em água..... | 27 |
| 3.4.5 | Avaliação nas plantas | 28 |
| 3.4.6 | Infiltariação de água no solo: duplo anéis concêntricos | 28 |
| 3.4.7 | Análise estatística..... | 30 |
| 3.5 | ESTUDO 2: RELAÇÃO ENTRE MÉTODOS PONTUAIS DA AVALIAÇÃO DA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO COM A INFILTRAÇÃO SOB CHUVA NATURAL | 30 |
| 3.5.1 | Infiltariação de água no solo: infiltariação com chuva natural..... | 30 |
| 3.5.2 | Infiltariação de água no solo: Infiltrômetro de Cornell | 31 |
| 3.5.3 | Avaliação das estimativas de escoamento..... | 33 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 34 |
| 4.1 | ESTUDO 1: ALTERAÇÕES EM PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS COM A UTILIZAÇÃO DE PLANTAS DE COBERTURA DO SOLO A CURTO PRAZO | 34 |
| 4.1.1 | Densidade, porosidade, macroporosidade, microporosidade e distribuição do tamanho de poros | 34 |
| 4.1.2 | Condutividade hidráulica do solo saturado e permeabilidade do solo ao ar | 39 |
| 4.1.3 | Estabilidade de agregados em água | 45 |
| 4.1.4 | Produção de massa úmida e massa seca..... | 47 |
| 4.1.5 | Infiltariação de água no solo..... | 49 |
| 4.2 | RELAÇÃO ENTRE MÉTODOS PONTUAIS DA AVALIAÇÃO DA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO COM A INFILTRAÇÃO SOB CHUVA NATURAL | 53 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2.1 Infiltração de água no solo..... | 53 |
| 4.2.2 Estimativa do escoamento superficial de água no solo..... | 57 |
| 5 CONCLUSÕES..... | 67 |
| 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 67 |

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de sistemas sustentáveis que mantém e melhoram a qualidade do solo e que aumente a capacidade produtiva tem sido enfatizada por diversos estudos, principalmente devido ao crescente aumento da população mundial e pelas mudanças climáticas. Em função disto, recentemente, a agricultura conservacionista tem sido uma ferramenta importante na gestão dos sistemas de produção integrados, afim de atender o desafio de aliar a produção de alimentos e fibras à conservação do ambiente.

A agricultura conservacionista abrange tanto o preplano conservacionista do solo, baseado no plantio direto, quanto a utilização de sistemas de rotação de culturas e o manejo de resíduos, onde a utilização de plantas de cobertura torna-se um elemento chave. Neste contexto, sistemas que incluem a utilização de espécies de plantas de cobertura, em relação aos sistemas de sucessão de culturas, tornam-se necessários para promover a agricultura conservacionista como técnica de preservar e melhorar a qualidade física, química e biológica do solo.

O uso e o manejo do solo adotado reflete diretamente nas propriedades do solo, principalmente as propriedades físicas. A utilização de um manejo de solo conservacionista com uso de plantas de cobertura, anuais ou perenes, pode promover a manutenção e/ou melhoria em propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, auxiliando assim na melhoria da estrutura do solo e com isso melhorando a dinâmica dos fluxos de água, reduzindo os processos erosivos e promovendo a infiltração de água no solo.

A manutenção de um dossel vegetativo denso sobre a superfície do solo é uma das principais características das plantas de cobertura. Esta cobertura, além do efeito benéfico do crescimento radicular das espécies na formação de bioporos e descompactação do solo, aporta carbono ao solo, tanto em superfície quanto em profundidade, contribuindo para promover a estruturação do solo e, principalmente, condicionando a infiltração de água no solo. A dissipação da energia cinética da gota da chuva e redução da velocidade do escoamento também auxiliam a infiltração de água no solo, pois reduzem a propagação do escoamento superficial e o selamento superficial gerado pelo impacto da gota durante as precipitações.

A infiltração de água no solo é um dos principais processos que ocorre no solo, estando diretamente relacionado a outras propriedades responsáveis por parte importante no ciclo hidrológico. Além de recarregar o solo e o lençol freático, é um fator condicionante ao escoamento superficial do solo, o qual tem impactos negativos para a conservação do solo, principalmente devido à perda de água e transporte de sedimentos e nutrientes.

Embora a infiltração tenha papel fundamental no ciclo hidrológico, um dos principais entraves está no método utilizado para a sua avaliação. Diferentes métodos têm sido utilizados para a sua determinação, buscando representar melhor o que ocorre a campo com chuva natural. Entre eles o simulador de chuvas destaca-se dos demais por melhor representar o que ocorre em uma precipitação natural, porém dificuldades quanto ao transporte e volume de água requerido induzem a busca e utilização por métodos menos trabalhosos e que requeiram um menor volume de água.

Esta dissertação está dividida em duas partes, onde buscou-se gerar conhecimento acerca de dois pontos importantes: na primeira parte verificou-se as alterações nas propriedades físico-hídricas que ocorrem no solo com o uso de plantas de cobertura de inverno após um curto período de tempo em um Argissolo. Na segunda buscou-se verificar a relação entre métodos de determinação da infiltração de água no solo por meio de métodos práticos, como o infiltrômetro de duplo anel e o infiltrômetro de Cornell, com a infiltração de água que ocorre em escala de parcela sob chuva natural.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PLANTAS DE COBERTURA E PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO

2.5.2 Plantas de cobertura: potencialidades e limitações

A utilização de plantas de cobertura como forma e promover a manutenção e aumento de produção de culturas de interesse tem sido reportada como uma prática milenar. Estudos reportam a utilização de plantas de cobertura como prática de adubação do solo a pelo menos 3.000 anos, sendo esta prática indispensável para antigas civilizações (FLORENTÍN et al., 2011).

Embora muito utilizada, com o advento dos insumos químicos, principalmente após a segunda guerra mundial, a utilização de plantas de cobertura em sistemas de produção passou a ser negligenciada. Ora, se antes a utilização destas espécies era de fundamental importância para a fertilidade do solo, agora, com a produção industrial de insumos (principalmente o N), a sua utilização foi “dispensável” como forma de manter/melhorar a fertilidade do solo (LAL, 2015a).

Apesar da agricultura “moderna” baseada no uso de maquinários, espécies de monoculturas altamente responsivas a insumos químicos e fertilizantes ter aumentado substancialmente a produção agrícola, também contribuiu de forma inquestionável os problemas ambientais, especialmente a degradação do solo, poluição e eutrofização da água, poluição do ar e emissão de gases de efeito estufa, além da perda de biodiversidade (LAL, 2015a).

Após mais de trinta anos de uma agricultura chamada de “moderna”, a utilização de plantas de cobertura retorna como prática para manter, recuperar e melhorar as propriedades do solo e do ambiente, como mencionado recentemente em matéria publicada pelo jornal New York Times. A habilidade destas espécies em melhorar a multifuncionalidade de sistemas agrícolas, principalmente em sistemas conservacionistas tem chamado atenção e tem sido alvo de novas pesquisas (BLANCO-CANQUI et al., 2015).

A utilização de espécies de plantas de cobertura é importante para o sequestro de carbono e contribuem para a redução da emissão de gases de efeito estufa nos

sistemas de produção agrícola (Lal, 2015b), além de promover outros benefícios ao sistema de produção (Tabela 1).

Figura 1 - Impactos de plantas de cobertura nas funções do solo.

| Atributos | Funções |
|-------------------|--|
| Qualidade do solo | Aumento de produtividade das culturas; Aumento dos teores de nutrientes e da capacidade de retenção de água; Melhor estrutura do solo, redução da compactação e encrostamento; Alta bioturbação; Promove a Agricultura Conservacionista e o plantio direto |
| Recursos hídricos | Aumenta a infiltração de água no solo e reduz o escoamento superficial; |
| Mudança climática | Aumento do estoque de C; Maior sequestro de C; Modera os fluxos de gases; Manutenção da temperatura do solo e os fluxos de calor. |

Fonte: Adaptado de LAL (2015b).

O seu uso é imprescindível para a promoção da Agricultura Conservacionista, onde a manutenção de resíduos de culturas sobre o solo e a rotação de culturas com a introdução de plantas de cobertura são conceitos chaves (REICOSKY, 2015). Tendo em vista a dificuldade de utilizar plantas em estações quentes devido ao conflito com culturas comerciais (mesma época de cultivo), como soja e milho, a utilização de espécies de estação fria apresenta-se como uma prática possível de aporte de resíduos e inserção da rotação de culturas no sistema de produção.

Esta possibilidade de inserção de culturas de estação fria pode ser observada ao contrastar a área plantada com culturas de verão no Rio Grande do Sul com as culturas de soja, milho, arroz, feijão e sorgo (superior a 7 milhões de hectares na safra 2015/16) com a área plantada com culturas de inverno (pouco mais de 1 milhão de hectares plantadas com as culturas de aveia, trigo, cevada, centeio,

canola e triticale) (Conab, 2016). Assim, mais de 5 milhões de hectares permanecem sob pousio invernal no estado do Rio Grande do Sul.

Diferentes fatores fazem com que o cultivo de espécies de plantas de cobertura deixe de ser utilizado. Entre os fatores estão o tempo e o trabalho necessário para o plantio, o elevado custo para plantar culturas de cobertura e a falta de sementes e o alto custo destas (Myers e Watts, 2015). No Brasil, a dificuldade ao crédito aliado a políticas ineficientes de incentivo a utilização de culturas de cobertura em sistemas de produção contribui para a baixa adoção da prática. Em relação aos benefícios apontados pelos agricultores, o aumento da matéria orgânica do solo e a redução da erosão e da compactação do solo (73,9; 51,2 % respectivamente) estão entre os principais (Myers e Watts, 2015).

2.1.2 Plantas de cobertura e alterações em propriedades físico-hídricas do solo

Dentre os atributos físicos do solo a densidade do solo tem sido o atributo mais utilizado para observar a ocorrência de camadas compactadas no perfil do solo. Tendo em vista que a compactação do solo tem afetado muitas áreas sob plantio direto (ABREU et al., 2004.; TORMENA et al., 2007.; KAISER, 2010), a utilização de plantas de cobertura pode aliviar a compactação do solo e reduzir a susceptibilidade do solo à compactação. O resultado deste benefício irá depender da espécie cultivada, do crescimento da cultura, das características e aporte de biomassa, principalmente de raízes. A utilização de espécies com sistemas radiculares agressivos, como o nabo forrageiro, pode reduzir a compactação do solo devido a habilidade das raízes em penetrar nas camadas compactadas, atuando como um formador de bioporos após a decomposição das raízes (CHEN e WEIL, 2010).

Trabalhos como o de Haruna e Nkongolo (2015), Blanco-Canqui et al (2011) e Steele et al (2012) reportam a redução da densidade do solo, aumento da porosidade do solo e do conteúdo de água no solo além de aumento na infiltração de água no solo e no diâmetro geométrico de agregados ao utilizar diferentes

espécies de plantas de cobertura do solo em sistemas de produção com longo histórico de utilização (acima de 10 anos).

O tempo de utilização de plantas de cobertura em sistemas de produção é um dos fatores que afetam as alterações em propriedades do solo. Trabalhos realizados a curto prazo, como o de Mukherjee e Lal (2015) e Mubiru e Coyne (2009), não apresentaram diferença na densidade do solo e na estabilidade de agregados, no entanto, nas camadas superficiais do solo (0 a 0,1 m) e inferiores, constatou-se tendência de redução da densidade e aumento na estabilidade de agregados em água. Os autores indicam períodos mais longos de avaliação para ser observado resultado na densidade do solo.

No Brasil, trabalhos como o de Genro Júnior et al (2004), Cunha et al (2011) avaliaram o efeito de diferentes coberturas vegetais em atributos físicos do solo não encontraram diferenças na densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade após um ano de cultivo com plantas de cobertura de estação fria em um Latossolo Vermelho. Apenas o diâmetro médio ponderado de agregados e a porcentagem de agregados maiores que 2 mm foi influenciada pelas culturas de cobertura.

Em período maior de tempo de avaliação, Argenton et al (2005) e Lanzanova et al (2010) observaram diferenças em sistemas que incluem plantas de cobertura, principalmente plantas de estação quente. Lanzanova et al (2016), observaram que após 16 anos de cultivo com consórcios de plantas o tratamento solo desnudo apresentou os maiores valores de densidade do solo e de resistência do solo à penetração, além de menor taxa de infiltração de água no solo, diferindo dos tratamentos com a adição de culturas. Após o primeiro ano de avaliação, os autores não verificaram diferença nas propriedades avaliadas.

A alteração nas propriedades do solo depende da quantidade de material que é aportado em superfície, ou a cobertura morta, e principalmente do crescimento das raízes. Estudando o efeito da densidade do solo e da resistência do solo à penetração no crescimento radicular de algumas espécies de plantas de cobertura em um Argissolo Vermelho, Reinert et al (2008) encontraram deformações morfológicas das raízes quando a densidade de um Argissolo Vermelho esteve acima de $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$. Nos atributos de densidade do solo e resistência a penetração, os mesmos autores não observaram diferenças entre a utilização de

espécies de plantas de cobertura e o pousio, indicando que seria necessário um período maior de tempo para que as plantas de cobertura recuperassem os atributos físicos do solo.

Quando avaliado as propriedades do solo ligadas a fluxos de água e ar, a utilização de plantas de cobertura apresenta resultados positivos. Nos trabalhos de Abreu (2004) e Hubbard et al (2013), os autores verificaram que a adição de culturas de cobertura de estação quente aumentou a condutividade hidráulica saturada e o conteúdo volumétrico de água nos tratamentos em relação ao solo sem cultivo.

Outra propriedade importante ligadas a fluxos no solo é a permeabilidade do solo ao ar, pois determina a geometria e continuidade do espaço poroso do solo, responsável pelo processo de difusão de gases no solo. Segundo Chen et al (2014), a permeabilidade ao ar pode ser um bom indicador para caracterizar as mudanças de estrutura do solo, sendo muito sensível a macroporosidade do solo e a continuidade dos poros (Horn, 2009). Em estudo conduzido por Chen et al (2014), os autores constataram aumento na permeabilidade ao ar com a utilização de plantas de cobertura em níveis mais altos de compactação do solo, indicando o potencial das espécies utilizadas (nabo forrageiro, colza e centeio) em romper as camadas compactadas e formar bioporos, responsáveis pelos fluxos de água e ar no solo.

Entre as diferentes propriedades do solo que podem ser utilizadas para avaliar a estrutura do solo, a infiltração de água é uma das propriedades mais importantes, visto que integra diferentes fatores, como a distribuição do tamanho e continuidade de poros, poros biológicos e a cobertura do solo (Reichert et al, 2003).

A decomposição das raízes produz macroporos contínuos e com maior estabilidade, o que favorece a infiltração de água e as trocas gasosas e reduz o escoamento superficial. Espécies com raízes profundas, com alta densidade e que possuem capacidade de romper camadas compactadas são preferíveis por formar bioporos, os quais são responsáveis por aumentar a condutividade hidráulica do solo e reduzir o potencial de gerar escoamento (Yu et al, 2016).

Resultados positivos da inclusão de plantas de cobertura foram observados por Wang et al (2016), Mitchell et al (2017) e Folorunso et al (1992). Em diferentes locais de avaliação, com diferentes culturas e em diferentes solos dos Estados Unidos, Forolunso et al (1992) verificaram resultados positivos na redução do

encrostamento superficial e no aumento da infiltração acumulada e da taxa de infiltração estável, chegando a duplicar em alguns tratamentos avaliados.

As informações encontradas na literatura acerca dos efeitos de diferentes espécies de plantas de cobertura em propriedades físicas e hídricas para diferentes solos e espécies de plantas necessitam de mais pesquisas (Blanco-Canqui et al, 2015), principalmente caracterizações mais abrangentes dessas propriedades em solos com classes texturais distintas, visto que, como observado no decorrer do texto, as alterações dependem não só das espécies utilizadas, mas também do tipo de solo, das propriedades físico hídricas avaliadas e do período de utilização das plantas.

2.2 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

A água presente no solo tem suma importância para a produção vegetal e é imprescindível para o suporte da vida na terra (SHUKLA, 2011). O processo de infiltração de água ocupa papel fundamental no ciclo hidrológico, pois, é através da infiltração que ocorre a recarga de água no solo, necessário para o crescimento vegetal, recarga de aquíferos e manutenção de corpos de água. Pode-se considerar a infiltração de água como o processo em que a água entra da superfície para o interior do solo durante precipitação e que determina o volume de água irá escoar superficialmente (HILLEL, 1998).

Diferentes fatores condicionam a infiltração de água no solo, como a porosidade, a densidade do solo, a textura, quantidade de cobertura do solo, a umidade inicial e o encrostamento superficial, além da estrutura e da variabilidade espacial do terreno (Pott e De Maria, 2003). O conhecimento da dinâmica do processo de infiltração de água no solo em sistemas agrícolas é grande importância, pois permite estabelece comparações de aspecto qualitativo e quantitativo entre os sistemas de uso, possibilitando a escolha de sistemas que melhor se adaptam a cada região (Panachuki, 2003).

A dificuldade de métodos utilizados em representar a infiltração que ocorre durante eventos de precipitação e a busca por novos métodos tem sido tema de pesquisas, como as de Panachuki et al (2006), Pott e De Maria (2003) e Rao et al

(1998). Para uma adequada determinação da infiltração de água no solo devem ser utilizados métodos que representem de forma semelhante ao que ocorre naturalmente (Panachuki et al., 2006).

As condições de superfície e conteúdo de umidade do solo são os principais fatores que afetam a determinação da infiltração de água no solo. Assim, os métodos que não consideram o impacto da gota da chuva no solo podem superestimar a infiltração de água no solo (Pruski et al., 1997). Isso foi constatado por Pott e De Maria (2003), onde ao utilizar infiltrômetro de aspersão (simulador de chuva) para a determinação da infiltração de água no solo, observaram, para três solos, que os valores de taxa de infiltração estável são menores em relação ao infiltrômetro de pressão (anel com carga hidráulica de 3 cm). Os autores também verificaram que o infiltrômetro de aspersão teve o processo de infiltração governado pela cobertura do solo, diferente do infiltrômetro de pressão, onde a infiltração foi conduzida pelo arranjo das partículas de solo (estrutura do solo).

Comparando a infiltração determinada usando o método de duplo anéis, simulador de chuva portátil e permeâmetro, Boers et al (1992) verificaram que o simulador de chuvas foi o método que apresentou os resultados mais realistas, diferente do infiltrômetro e do permeâmetro, que superestimaram os resultados. Segundo os Autores , o método de duplo anel não é adequado para análise dos processos erosivos, devido principalmente a não simulação do impacto da gota e do selamento superficial.

Os simuladores de chuva são os equipamentos mais apropriados para a determinação da infiltração de água no solo em relação aos métodos que não levam em consideração o impacto da gota no solo, porém, a dificuldade de transporte e manuseio, devido ao seu tamanho e consumo de água, tornam-se as principais limitação do seu uso. Além disso, por utilizar uma intensidade constante de precipitação, os simuladores não produzem precipitações fisicamente semelhante à precipitação com chuva natural (ISERLOH et al., 2013).

Uma alternativa aos simuladores de chuva são os métodos que necessitam menor quantidade de água e equipamentos, como o método de duplo anel concêntrico e o infiltrômetro de Cornell (Ogden et al., 1997). A infiltração de água medida com chuva natural é difícil de ser mensurada, pois diferentes fatores afetam na infiltração. A precipitação não é constante e com mesma intensidade e, muitas

vezes, o suprimento de água não é suficiente para gerar escoamento durante todo o período de avaliação, além da cobertura alterar as propriedades de superfície, assim como o selamento superficial. Outro fator importante é a área de avaliação, embora a infiltração com chuva pode ser determinada em uma área maior e mais representativa que os métodos pontuais, mais difícil se torna a determinação da TIE, principalmente pela interferência da rugosidade superficial, tempo de escoamento, dinâmica da precipitação e da variabilidade espacial.

Em trabalho realizado por Rao et al (1998), os autores avaliaram a taxa de infiltração determinada com chuva natural e compararam com a infiltração determinada pelo método de duplo anel e permeâmetro de disco. Conforme os autores, para solo desnudo, a taxa de infiltração determinada com chuva natural foi de cinco a seis vezes menor que os outros métodos, motivo atribuído principalmente a formação de encrostamento superficial, o que não foi observado com os outros métodos. Os autores também encontraram correlação entre a cobertura do solo pelo dossel e a taxa de infiltração com chuva, indicando que a cobertura é um dos principais fatores relacionados a infiltração com chuva natural.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCAL E SOLO

O estudo foi realizado na área experimental pertencente ao departamento de solos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), município de Santa Maria, Rio Grande do Sul. A região de Santa Maria situa-se na zona de transição entre a Depressão Periférica Sul-Rio-Grandense, também conhecida por Depressão central e a escarpa arenito-basáltica do Planalto Meridional Brasileiro (SARTORI, 1979). O clima da região da área de estudo é o Cfa da classificação de Köppen, o qual corresponde ao clima subtropical úmido, sem estiagens, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C, e a temperatura do mês mais frio entre -3°C e 18°C (MORENO, 1961).

O solo da área de estudo é classificado como Argissolo Vermelho distrófico arênico (EMBRAPA., 2013). Na tabela 1 é apresenta a composição granulométrica e

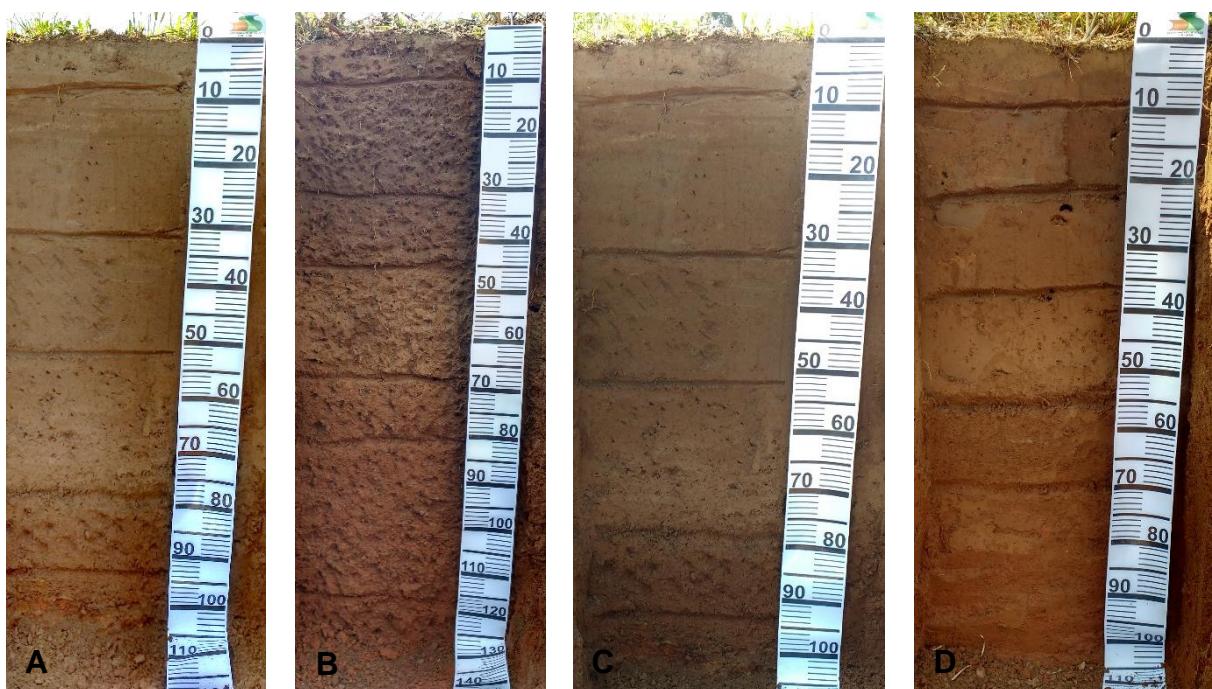
espessura dos horizontes média dos quatro blocos do experimento. O ensaio de campo utilizado para as avaliações foi instalado em abril de 2010, para a avaliação da injeção de dejetos líquidos de suínos no solo (MIOLA, 2014). A área vinha sendo cultivada com sucessão aveia - milho até o março de 2015, e a partir desta data a área permaneceu em pousio até fevereiro de 2016.

Tabela 1- Composição granulométrica do perfil de solo do local do experimento. Santa Maria, RS.

| Horizonte | Profundidade - - m - - | Areia | Areia Fina | Silte | Argila |
|-----------|---------------------------|-------|--------------------|-------|--------|
| | | | g kg ⁻¹ | | |
| Ap | 0 - 0,1 | 689,8 | 469,1 | 225,5 | 84,7 |
| A1 | 0,1 - 0,3 | 652,1 | 460,7 | 235,3 | 112,6 |
| A2 | 0,3 - 0,5 | 620,4 | 454,4 | 263,8 | 115,7 |
| E | 0,5 - 0,7 | 620,8 | 474,4 | 301,4 | 77,8 |
| Bt1 | 0,7 - 0,8 | 413,7 | 307,9 | 237,6 | 348,7 |
| Bt2 | 0,8 - 1,25 + | 340,1 | 260,5 | 198,3 | 461,6 |

Fonte: O O Autor.

Figura 2 - Perfis de solo para cada bloco do local do experimento. Santa Maria, RS.



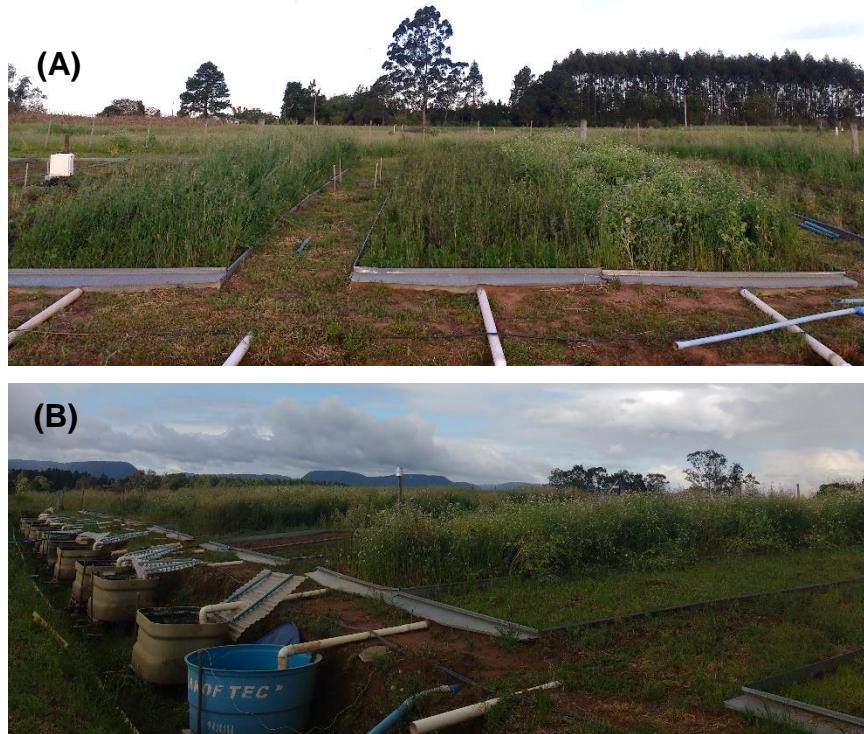
A - Bloco 1; B - Bloco 2; C - Bloco 3; D - Bloco 4.

Fonte: O Autor.

3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

O delineamento experimental utilizado na instalação do experimento foi blocos ao acaso, com quatro tratamentos distribuídos em quatro blocos totalizando 16 unidades experimentais de 3 X 14,5 m, área de 43,5 m² por unidade experimental. As parcelas são delimitadas por chapas galvanizadas com 30 cm de altura, cravadas até 10 cm no solo. Na parte inferior das parcelas uma calha coletora foi instalada para que todo o volume de água escoado seja direcionado para o interior de uma caixa d'água com capacidade de 1m³. A declividade média das parcelas é de 5 % e possuem maior comprimento no sentido do declive.

Figura 3 - Vista parcial das parcelas cultivadas com plantas de cobertura (A) e do experimento (B).



Fonte: O Autor.

Para avaliar o efeito da utilização de plantas de cobertura, implantou-se quatro tratamentos compostos por:

- a) Vegetação espontânea;
- b) Aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) + nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.);
- c) Aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) + ervilhaca peluda (*Vicia villosa* Roth);
- d) Solo desnudo.

Estes tratamentos foram testados por apresentar potencial para aumentar o teor de C e N no solo, melhorar as condições físico-hídricas com vistas ao aumento da infiltração de água no solo. Assim, apresentam potencial para ser utilizadas em áreas agrícolas, em áreas de produção com plantas perenes e em áreas com produção de culturas anuais.

3.3 CULTURAS E TRATOS CULTURAIS

As culturas de aveia + nabo e aveia + ervilhaca foram semeadas a lanço no período de outono inverno. Para as culturas de aveia e nabo utilizou-se as porcentagens de 30% e 70% do total recomendado por hectare, sendo 100 e 15 kg ha⁻¹ respectivamente. As culturas de aveia e ervilhaca foram semeadas com porcentagens de 45 e 55% do total recomendado por hectare, sendo 100 e 80 kg ha⁻¹, respectivamente. Após 30 dias da emergência foi realizada adubação nitrogenada com 100 kg de uréia (42 % de N).

Antes da implantação das culturas realizou-se dessecação química das parcelas, onde utilizou-se uma dose de 4 L ha⁻¹ de glifosate. No tratamento solo desnudo foram realizadas capinas químicas esporadicamente e no tratamento vegetação espontânea manteve-se a vegetação espontânea composta principalmente por buva (*Conyza bonariensis*), grama (*Paspalum notatum*), aveia (*Avena sativa*), azevém (*Lolium multiflorum*), picão preto (*Bidens pilosa*) e serralha (*Sonchus asper*).

O tratamento solo desnudo foi mantido sem vegetação com a utilização de capina química (4 L ha⁻¹ de glifosato) periodicamente. Optou-se por este método para evitar revolvimento do solo pelo arranquio ou capina manual.

3.4 ESTUDO 1: ALTERAÇÕES EM PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS COM A UTILIZAÇÃO DE PLANTAS DE COBERTURA DO SOLO A CURTO PRAZO

Para gerar conhecimento sobre a influência da utilização de plantas de cobertura em propriedades do solo, foram avaliadas: a densidade do solo, a porosidade total, a microporosidade, a macroporosidade, a distribuição do tamanho de agregados estáveis em água (DMG, DMP), a condutividade hidráulica do solo saturado, a permeabilidade ao ar e a infiltração de água no solo.

3.4.1 Densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade

Para avaliar o efeito de diferentes sistemas com plantas de cobertura sobre a estrutura do solo foram coletadas amostras com estrutura preservada, antes da implantação, mês 04/2016 (DATA 1) e após o primeiro ciclo de culturas anuais, no mês 10/2016 (DATA 2), nas camadas de 0,0 a 0,05; 0,05 a 0,1; 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,3 m de profundidade. Para a coleta, utilizou-se anéis volumétricos com 0,04 m de altura e 0,057 m de diâmetro. Em cada camada foram coletados duas subamostras, que foram preparadas em laboratório, saturadas por capilaridade e submetidas às tensões de -1, -6 e -10 kPa em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006), e a tensão de -100 kPa em câmara de Richards (KLUTE, 1986). Depois da determinação da condutividade hidráulica do solo saturado as amostras foram secas em estufa a 105°C.

As determinações de densidade (Ds), porosidade total (PT), macro (Mac) e microporosidade (Mic) seguiram as recomendações de Embrapa (2011). Para a determinação da microporosidade utilizou-se a tensão de -6 kPa.

3.4.2 Fluxo de ar e cálculo da permeabilidade ao ar

No laboratório, as amostras coletadas para determinar a densidade do solo, foram saturadas, pesadas e submetidas às tensões de 1 e 10 kPa em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006) e 100 kPa em Câmara de Richards. Após estar equilibradas em cada tensão, mediu-se o fluxo de ar nas amostras utilizando um permeâmetro de carga constante, onde manteve-se um gradiente de pressão constante de 0,1 kPa. O equipamento utilizado e o procedimento adotado foi igual ao descrito por Kaiser (2010).

Para calcular a permeabilidade ao ar, primeiro calculou-se a condutividade do ar no solo (K_l) através da equação:

$$K_l = \rho_l \cdot g \frac{\Delta V \cdot l}{\Delta t \cdot \Delta p \cdot A} \quad (1)$$

Onde:

K_l = condutividade ao ar (cm s^{-1});

ρ_l = densidade do ar no momento da medida (g cm^{-3});

g = aceleração da gravidade (981 cm s^{-2});

ΔV = quantidade de ar que passa na amostra na Δt (cm^3);

Δt = variação de tempo (s)

l = altura da amostra (cm);

Δp = pressão do ar que passa pela amostra (1 cm de coluna de água = 1000 dinas cm^{-2} ; Dinas = g cm s^{-2});

A = área do cilindro (cm^2).

Para calcular a densidade do ar no momento da análise, utilizou-se a equação:

$$\rho_l = \rho_n \left(\frac{T_n \cdot p}{p_n \cdot T} \right) \quad (2)$$

Onde:

ρ_l = densidade do ar (kg m^{-3})

ρ_n = densidade padrão do ar ($1,293 \text{ kg m}^{-3}$)

T_n = temperatura padrão (273,15 ° K)

p = pressão atmosférica durante a medida (mbar)

p_n = pressão atmosférica padrão (1013 mbar)

T = temperatura do ar durante a medida (°K)

Com o valor K_l calculou-se a permeabilidade do solo ao ar (K_a) a partir da equação 3.

$$K_a = K_l \frac{\eta}{\rho_l g} \quad (3)$$

Onde:

K_a = permeabilidade ao ar (cm s⁻¹);

K_l = condutividade ao ar (cm s⁻¹);

η = Viscosidade do ar (g s⁻¹ cm⁻¹);

ρ_l = densidade do ar no momento da medida (g cm⁻³);

g = aceleração da gravidade (981 cm s⁻²)

O espaço aéreo ou a porosidade de aeração (E_a) foi calculado utilizando a equação 4 para as tensões de 1, 10 e 100 kPa.

$$E_a = PT - \theta \quad (4)$$

3.4.3 Condutividade hidráulica do solo saturado

Após as amostras estarem equilibradas no ponto de -100 kPa nas membranas de Richards, foram novamente saturadas e mediu-se o fluxo de água em permeâmetro de carga constante.

Para calcular a condutividade hidráulica saturada utilizou-se a equação 5.

$$K = \left(\frac{Q \cdot L}{A \cdot H \cdot t} \right) \quad (5)$$

Onde:

K = condutividade hidráulica em cm h⁻¹;

Q = volume do percolado em mL;
 L = altura do bloco do solo em cm;
 H = altura do bloco do solo e da coluna em cm;
 A = área do cilindro em cm²;
 t = tempo em horas.

Avaliação da distribuição do tamanho de agregados estáveis em água

Para avaliar a distribuição do tamanho de agregados estáveis em água, foram coletados monólitos de solo com estrutura preservada nas camadas de 0 a 0,05 e 0,05 a 0,1 m de profundidade. A distribuição do tamanho de agregados foi realizada pelo método padrão de Kemper e Chepil (1965). O tamisamento dos agregados em água foi realizado no aparelho de oscilação vertical de Yoder, durante dez minutos (30 oscilações por minuto). Agregados com diâmetro entre 8 e 4,76 mm foram tamisados utilizando peneiras com diâmetro de malha 4,76; 2,0; 1,0 e 0,21 mm, separando agregados em cinco classes (8,00 - 4,76; 4,76 - 2,00; 2,00 - 1,00; 1,00 - 0,21 e, menores que 0,21 mm). O solo que permaneceu em cada peneira foi pesado após secar em estufa (105 °C) e disperso com NaOH a 6% de concentração para descontar materiais inertes, como areia e demais impurezas contidas em cada classe.

Para quantificar a estabilidade estrutural do solo determinou-se o diâmetro médio geométrico (DMG), o diâmetro médio ponderado (DMP) conforme as equações abaixo:

$$DMP = \sum_{i=1}^n (MAi \times \frac{di}{MAT}) \quad (6)$$

$$DMG = \exp \left(\sum_{i=1}^n (MAi \times \ln(di)/MAT) \right) \quad (7)$$

3.4.5 Avaliação nas plantas

No estágio de pleno florescimento das culturas anuais foram coletadas amostras de material vegetal para determinar a produção massa seca. Para isso, utilizou-se um quadrado com 0,25 m² e as coletas realizadas em dois locais para cada parcela. O material foi seco em estufa até atingir peso constante e a quantidade expressa em kg ha⁻¹.

3.4.6 Infiltração de água no solo: duplo anéis concêntricos

Para o método do duplo anel, utilizou-se dois anéis, com diâmetros de 0,2 e 0,4 m e 0,2 e 0,15 m de altura respectivamente, introduzidos 0,1 m no solo de maneira que ficassem concêntricos.

Para medição do volume de água infiltrada, utilizou-se infiltrômetros (Figura 5) fabricados com um cano de PVC de 100 mm, com um registro de esfera em ambas as extremidades, com uma escala graduada externamente, visualizada através de uma mangueira plástica transparente, suspensos por meio de um tripé de ferro e alocado no interior do anel interno, mantendo uma lâmina de água constante com carga hidráulica de 0,04 m de altura. A lâmina de água do anel externo foi mantida manualmente com carga hidráulica de 0,04 m de altura.

Figura 4 - Infiltrômetro de duplo anel concêntrico utilizado para a determinação da infiltração de água no solo.



Fonte: O Autor.

A lâmina de água do anel externo foi mantida constante para assegurar que o processo de infiltração seja prioritariamente no sentido vertical, não ocorrendo movimento lateral de água a partir do anel interior. As leituras foram realizadas nos tempos 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80 e 90 minutos após o início do teste. As observações de infiltração foram convertidas em taxas de infiltração e estas ajustadas por modelos empíricos de Kostiakov (Bernardo, 2002) (Equação 9).

$$VI = aT^{b-1} \quad (9)$$

onde:

VI = taxa de infiltração de água no solo (mm h^{-1})

a e b = Parâmetros do modelo;

3.4.7 Análise estatística

Para analisar os dados considerou-se o delineamento experimental blocos ao acaso com parcelas subdivididas. Assim, utilizou-se como fator primário os tratamentos (SD, VE, AN e AE) e a época de avaliação (DATA 1 e DATA 2) como sub fator para cada profundidade. Aplicou-se o teste de Tukey para a comparação de médias com 5 % de probabilidade de erro. Os dados de permeabilidade ao ar e condutividade hidráulica do solo saturado foram submetidos ao teste de normalidade e se necessário transformados.

3.5 ESTUDO 2: RELAÇÃO ENTRE MÉTODOS PONTUAIS DA AVALIAÇÃO DA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO DOLO COM A INFILTRAÇÃO SOB CHUVA NATURAL

Para avaliar a relação entre a infiltração medida com uso de métodos pontuais e a infiltração de água com chuva natural, utilizou-se três tratamentos avaliados no estudo anterior.

A avaliação da infiltração pelo método do duplo anel concêntrico 3.4.7. Para determinar a TIE utilizou-se a média das três últimas leituras de cada teste.

3.5.1 Infiltração de água no solo: infiltração com chuva natural

Para determinação da infiltração de água sob chuva natural, as parcelas foram delimitadas com chapas metálicas de 0,3 m de altura, cravadas 0,1 m no solo. Na parte inferior, as parcelas possuem uma calha coletora que encaminha o escoamento gerado para o interior de um reservatório com capacidade de 1 m³.

A precipitação foi avaliada através de pluviômetros automáticos, com intervalos de medição de 1 min, distribuídos espacialmente no experimento. O escoamento gerado foi determinado automaticamente, com leituras realizadas em intervalos de 1 min, utilizando sensores de nível instalados em cada caixa ligados a um datalogger Campbell CR 23. Estes sensores fazem leituras da pressão exercida

pela coluna de água armazenada, e o volume determinado através da calibração das caixas em função da pressão exercida. Assim, foi possível calcular o volume escoado em cada parcela em intervalos de 1 min.

A partir dos dados de precipitação e de escoamento foi possível calcular a precipitação acumulada, o escoamento acumulado e a infiltração acumulada. A infiltração acumulada foi calculada pela diferença entre a precipitação acumulada e o escoamento acumulado.

A estimativa do escoamento foi realizada subtraindo a taxa infiltração estável da precipitação após o início do escoamento. Para isso, utilizou-se a equação 10, descrita em Rao et al (1998).

$$Q = \int_{t=t_n}^t (p - i) dt \quad (10)$$

Onde: Q é o escoamento calculado, p é a taxa de precipitação, i é a taxa de infiltração estável, t o tempo e t_n o tempo de início do escoamento.

Entre o período de maio a novembro foram realizados monitoramentos de escoamento.

3.5.2 Infiltração de água no solo: Infiltrômetro de Cornell

O infiltrômetro de Cornell (Ogden et al., 1997) (Figura 6) é um simulador de chuva portátil, constituído por um anel com 23 cm de diâmetro cravado 7,5 cm no solo e um infiltrômetro acoplado sobre o anel, o qual permite simular chuva com intensidade de 300 mm h^{-1} . O infiltrômetro é formado por um reservatório de 0,23 m de diâmetro por 0,5 m de altura, contendo na parte inferior microtúbulos de 0,06 cm de diâmetro por 19 cm de comprimento, espaçados em 2 cm. Na parte superior, o infiltrômetro possui uma entrada para recarga e outra onde está inserido um capilar de vidro onde regula-se a altura da carga hidráulica que permite simular a chuva desejada. Optou-se por utilizar uma intensidade de 300 mm h^{-1} devido a maior uniformidade da precipitação.

Figura 5 - Infiltrômetro de Cornell utilizado para avaliação da Infiltração de água no solo.



Fonte: O Autor.

Para coletar o escoamento, o anel possui um orifício onde é acoplado uma mangueira que direciona o volume escoado para o interior de um reservatório. O início do escoamento é contabilizado a partir da formação de um filete contínuo de água na mangueira coletora. O teste teve duração de 60 minutos, sendo realizadas leituras simultâneas de precipitação e escoamento a cada 3 min.

A taxa de infiltração foi calculada através da diferença entre a chuva aplicada e o escoamento para cada intervalo de tempo. Para ajustar os valores observados de infiltração de água no solo, utilizou o modelo de Smith, modificado por Alves e Cabeda (1999), sendo:

$$i = (R - i_c) \cdot \left(\frac{t_e}{t} \right)^b + i_c \quad (11)$$

Em que:

i = Taxa de infiltração de água (mm h^{-1});

R = Intensidade de chuva (mm h^{-1});

i_c = Taxa constante de precipitação (mm h^{-1});

te = Tempo de início do escoamento (min);
 t = Tempo após o início do escoamento (min);
 b = parâmetro de ajuste do modelo.

3.5.3 Avaliação das estimativas de escoamento

O desempenho das TIE determinada pelos diferentes métodos de avaliação na estimativa do escoamento superficial em eventos de chuva utilizou-se os índices de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e a razão entre a raiz quadrada dos erros médios e o desvio padrão dos dados observados (RSR) (MORIASI et al., 2007), onde:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_{média})^2} \right] \quad 12$$

em que Y_i^{obs} é a i-ésima observação da variável que está sendo observada, Y_i^{sim} é o i-ésimo valor simulado da variável que está sendo simulada, $Y_{média}$ é a média observada da variável e n o número total de observações. Os valores de NSE podem estar entre $-\infty$ e 1, sendo $NSE = 1$ o valor ótimo. Valores entre 0 e 1 são considerados indicadores de níveis adequados de desempenho dos modelos.

$$RSR = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_{média})^2} \right]} \quad 13$$

em que Y_i^{obs} é a i-ésima observação da variável que está sendo observada, Y_i^{sim} é o i-ésimo valor simulado da variável que está sendo simulada, $Y_{média}$ é a média observada da variável e n o número total de observações. O RSR pode variar de 0 a $+\infty$, sendo o valor zero ótimo ($RSR = 0$).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ESTUDO 1: ALTERAÇÕES EM PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS COM A UTILIZAÇÃO DE PLANTAS DE COBERTURA DO SOLO A CURTO PRAZO

4.1.1 Densidade, porosidade, macroporosidade, microporosidade e distribuição do tamanho de poros

A interação entre os sistemas de manejo de plantas de cobertura e as datas avaliadas não foi significativa para as variáveis avaliadas, nas quatro camadas avaliadas. Assim, foi comparado o efeito simples de cada um dos fatores (coberturas e datas) nas diferentes camadas avaliadas.

Para a densidade do solo (Tabela 2), não foi observada diferença entre os tratamentos e entre as datas nas camadas de 0 a 0,05 e 0,1 a 0,2 m. Apenas a camada de 0,05 a 0,1 m a densidade do solo diferiu entre a data 1 e a data 2. Este resultado corrobora com os resultados encontrados por Mukherjee e Lal (2015) e Cunha et al (2011), que também não verificaram diferença na densidade do solo após um ano do cultivo de plantas de cobertura.

Embora não tenha sido observada diferença na camada superficial, os tratamentos AE e NA apresentaram uma redução da densidade do solo (7 e 5 %, respectivamente) da data 1 para a data 2 na camada superficial. Nos tratamentos SD e VE foi observada um aumento da densidade da data 1 para a data 2, passando de 1,43 Mg m⁻³ na data 1 para 1,47 Mg m⁻³ na data 2 no tratamento SD. Segundo Silva e Kato (1997), o efeito do impacto das gotas da chuva promove o selamento superficial, repercutindo efeitos significativos no aumento da densidade, resistência à penetração, diminuição da taxa de infiltração e compactação do solo.

Para as camadas de 0,1 a 0,3 m não foram observadas diferenças entre os tratamentos e as datas avaliadas, indicando que esta camada a recebe pouca influência da utilização ou não de plantas de cobertura.

Os valores observados neste estudo ainda são baixos em relação aos valores observados por Reinert et al. (2008), onde os autores encontraram valores médios de densidade acima de 1,70 Mg m⁻³ em solo franco arenoso, sendo os valores máximos de 1,92 Mg m⁻³ a partir dos 0,10 m de profundidade. Os mesmos autores

verificaram restrição ao crescimento das raízes das plantas de cobertura em densidades acima de 1,75 Mg m⁻³.

O acúmulo de material orgânico em superfície nos tratamentos com plantas de cobertura, aliado ao crescimento radicular das culturas também contribuiu para menor densidade do solo na camada superficial, que também foi verificado por Nascente et al (2015) ao utilizar diferentes espécies de plantas de cobertura.

Tabela 2 - Densidade do solo (Mg m⁻³) em manejos de cobertura do solo em um Argissolo Vermelho, Santa Maria, RS.

| DATA | SD | VE | AN | AE | MÉDIA |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 - 0,05 | | | | | |
| DATA 1 | 1,43 | 1,44 | 1,51 | 1,50 | 1,47 a |
| DATA 2 | 1,47 | 1,48 | 1,44 | 1,40 | 1,45 a |
| MÉDIA | 1,45 A | 1,46 A | 1,47 A | 1,45 A | |
| 0,05 - 0,10 | | | | | |
| DATA 1 | 1,61 | 1,65 | 1,62 | 1,62 | 1,63 a |
| DATA 2 | 1,63 | 1,55 | 1,60 | 1,60 | 1,59 b |
| MÉDIA | 1,62 A | 1,60 A | 1,61 A | 1,61 A | |
| 0,10 - 0,20 | | | | | |
| DATA 1 | 1,63 | 1,70 | 1,66 | 1,64 | 1,66 a |
| DATA 2 | 1,63 | 1,62 | 1,66 | 1,65 | 1,64 a |
| MÉDIA | 1,63 A | 1,66 A | 1,66 A | 1,64 A | |
| 0,20 - 0,30 | | | | | |
| DATA 1 | 1,62 | 1,68 | 1,67 | 1,64 | 1,65 a |
| DATA 2 | 1,69 | 1,63 | 1,64 | 1,63 | 1,64 a |
| MÉDIA | 1,65 A | 1,65 A | 1,65 A | 1,63 A | |

Médias seguidas por mesma letra, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade de erro. SD - solo desnudo, VE - vegetação espontânea, AN - aveia + nabo, AE - aveia + ervilhaca.

Fonte: O Autor.

A porosidade do solo (Tabela 3) não diferiu entre os tratamentos e as datas avaliadas nas camadas de 0 a 0,5 e 0,1 a 0,3 m. Apenas na camada de 0,05 a 0,1 m são observadas diferenças entre as datas avaliadas, indicando que o crescimento

radicular nos tratamentos com plantas foi eficiente em formar poros, seja pelo crescimento radicular, seja pela melhoria na estruturação do solo. Nicoloso (2008) também encontrou aumento na porosidade total do solo em um Latossolo Vermelho quando cultivado com aveia e nabo como culturas de inverno visando a descompactação do solo.

Em trabalho realizado por Bertol et al (2004), os autores também não encontraram diferenças na porosidade do solo ao avaliar sistemas de sucessão e rotação de culturas em semeadura direta, comparadas ao campo nativo. Após um ano de avaliação com diferentes sistemas de culturas em plantio direto, Lanzanova et al (2010) também não encontraram diferença na porosidade total do solo entre tratamentos com a inclusão de plantas de cobertura, pousio e solo descoberto.

Tabela 3 - Porosidade total do solo ($m^3 m^{-3}$) em manejos de cobertura do solo, Santa Maria, RS.

| DATA | SD | VE | AN | AE | MÉDIA |
|------------|---------|--------|---------|--------|--------|
| 0 - 0,05 | | | | | |
| DATA 1 | 0,44 | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,42 a |
| DATA 2 | 0,42 | 0,43 | 0,43 | 0,45 | 0,43 a |
| MÉDIA | 0,43 A | 0,42 A | 0,42 A | 0,43 A | |
| 0,05 - 0,1 | | | | | |
| DATA 1 | 0,38 | 0,35 | 0,37 | 0,37 | 0,36 b |
| DATA 2 | 0,37 | 0,39 | 0,37 | 0,38 | 0,38 a |
| MÉDIA | 0,37 A | 0,37 A | 0,37 A | 0,37 A | |
| 0,1 - 0,2 | | | | | |
| DATA 1 | 0,36 | 0,34 | 0,35 | 0,35 | 0,35 a |
| DATA 2 | 0,37 | 0,37 | 0,36 | 0,36 | 0,36 a |
| MÉDIA | 0,37 A | 0,35 A | 0,35 A | 0,36 A | |
| 0,2 - 0,3 | | | | | |
| DATA 1 | 0,37 | 0,34 | 0,35 | 0,36 | 0,35 a |
| DATA 2 | 0,35 | 0,36 | 0,37 | 0,37 | 0,36 a |
| MÉDIA | 0,36 AB | 0,35 B | 0,36 AB | 0,37 A | |

Médias seguidas por mesma letra, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade de erro. SD - solo desnudo, VE - vegetação espontânea, AN - aveia + nabo, AE - aveia + ervilhaca.

Fonte: O Autor.

A microporosidade do solo também não diferiu entre os tratamentos nas quatro camadas avaliadas (TABELA 4). Entre as datas avaliadas, apenas na camada de 0,05 a 0,1 m foi verificado diferença, o que ocorreu devido ao aumento da microporosidade. Este aumento foi condicionado por um pequeno aumento na porosidade total do solo e manutenção da macroporosidade. Nas demais camadas avaliadas não houve diferença entre as camadas avaliadas.

Tabela 4 - Microporosidade do solo ($m^3 m^{-3}$) em manejos de cobertura do solo, Santa Maria, RS.

| DATA | SD | VE | AN | AE | MÉDIA |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 - 0,05 | | | | | |
| DATA 1 | 0,24 | 0,25 | 0,23 | 0,24 | 0,24 b |
| DATA 2 | 0,25 | 0,25 | 0,27 | 0,28 | 0,26 a |
| MÉDIA | 0,24 A | 0,25 A | 0,25 A | 0,26 A | |
| 0,05 - 0,1 | | | | | |
| DATA 1 | 0,23 | 0,24 | 0,23 | 0,23 | 0,23 b |
| DATA 2 | 0,24 | 0,25 | 0,24 | 0,25 | 0,24 a |
| MÉDIA | 0,24 A | 0,24 A | 0,23 A | 0,24 A | |
| 0,1 - 0,2 | | | | | |
| DATA 1 | 0,23 | 0,24 | 0,24 | 0,23 | 0,24 a |
| DATA 2 | 0,24 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,24 a |
| MÉDIA | 0,24 A | 0,24 A | 0,24 A | 0,24 A | |
| 0,2 - 0,3 | | | | | |
| DATA 1 | 0,24 | 0,25 | 0,24 | 0,24 | 0,24 a |
| DATA 2 | 0,26 | 0,26 | 0,25 | 0,25 | 0,25 a |
| MÉDIA | 0,24 A | 0,25 A | 0,24 A | 0,25 A | |

Médias seguidas por mesma letra, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade de erro. SD - solo desnudo, VE - vegetação espontânea, AN - aveia + nabo, AE - aveia + ervilhaca.

Fonte: O Autor.

Assim como para os outros parâmetros avaliados, a macroporosidade não foi influenciada pelo cultivo de plantas de cobertura após um cultivo na camada de 0 a

0,3 m de profundidade. Uma das motivos foi que as coletas das amostras foram realizadas 20 dias após a dessecação das culturas, período curto para ocorrer decomposição das raízes, principais responsáveis pela formação de bioporos no solo.

Para o solo ser fisicamente adequado ao crescimento de plantas, este deve possuir, no mínimo, $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de macroporos para manter em níveis adequados a aeração do solo e as trocas gasosas (DREWRY et al, 2008). Apenas o tratamento VE apresentou macroporosidade inferior a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na camada de 0,2 a 0,3 m (Tabela 5).

Tabela 5 - Macroporosidade do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) em manejos de cobertura do solo, Santa Maria, RS.

| DATA | SD | VE | AN | AE | MÉDIA |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 - 0,05 | | | | | |
| DATA 1 | 0,20 | 0,18 | 0,17 | 0,16 | 0,18 a |
| DATA 2 | 0,17 | 0,16 | 0,17 | 0,17 | 0,17 a |
| MÉDIA | 0,18 A | 0,17 A | 0,17 A | 0,16 A | |
| 0,05 - 0,1 | | | | | |
| DATA 1 | 0,14 | 0,11 | 0,13 | 0,13 | 0,13 a |
| DATA 2 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 a |
| MÉDIA | 0,13 A | 0,12 A | 0,13 A | 0,13 A | |
| 0,1 - 0,2 | | | | | |
| DATA 1 | 0,13 | 0,09 | 0,10 | 0,12 | 0,11 a |
| DATA 2 | 0,12 | 0,11 | 0,10 | 0,11 | 0,11 a |
| MÉDIA | 0,12 A | 0,10 A | 0,10 A | 0,12 A | |
| 0,2 - 0,3 | | | | | |
| DATA 1 | 0,13 | 0,09 | 0,12 | 0,10 | 0,11 a |
| DATA 2 | 0,09 | 0,10 | 0,12 | 0,12 | 0,10 a |
| MÉDIA | 0,11 A | 0,09 A | 0,11 A | 0,11 A | |

Médias seguidas por mesma letra, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade de erro. SD - solo desnudo, VE - vegetação espontânea, AN - aveia + nabo, AE - aveia + ervilhaca.

Fonte: O Autor.

Bertol et al. (2004) em experimento com sistema de cultivo em rotação e sucessão de culturas, sob semeadura direta e preparo convencional ao longo de seis anos, concluíram ser necessário um período de tempo maior de avaliações para que a rotação de culturas expresse seus benefícios, em relação à sucessão, sobre a porosidade do solo.

4.1.2 Condutividade hidráulica do solo saturado e permeabilidade do solo ao ar

A condutividade hidráulica do solo saturado e a permeabilidade ao ar são propriedades dinâmicas do solo, influenciadas principalmente pela quantidade, diâmetro e continuidade dos poros (KAISER, 2010).

A condutividade hidráulica do solo saturado (TABELA 6) não diferiu entre os tratamentos avaliados nas quatro camadas. Embora não tenha ocorrido diferença entre os tratamentos, cabe destacar a redução no tratamento SD na camada de 0 a 0,1 m de profundidade, o que deve-se principalmente a redução da macroporosidade, da porosidade total e o aumento da densidade do solo. No tratamento NA observa-se aumento na Ksat, o que corrobora com Abreu et al (2004), que também verificou que a utilização de plantas de cobertura com raízes pivotantes tem se mostrado eficiente em aumentar e manter elevados valores de Ksat, principalmente por criar poros contínuos no solo.

Entre as datas de coleta, a data 2 apresentou maiores valores de Ksat, diferindo da data 1 em todas as camadas avaliadas. Esta diferença entre as datas deve-se principalmente pelo aumento de Ksat nos tratamentos com cobertura, em relação a primeira coleta, indicando que as raízes em decomposição, principalmente as mais finas, colaboraram para a criação de poros contínuos, os quais são os principais responsáveis pelo transporte de água no solo.

Tabela 6 - Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}) em manejos de cobertura do solo, Santa Maria, RS.

| DATA | SD | VE | AN | AE | MÉDIA |
|------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 0 - 0,05 | | | | | |
| DAT 1 | 71,3 | 94,1 | 82,9 | 81,4 | 82,4 b |
| DAT 2 | 50,6 | 176,75 | 215,2 | 144,2 | 146,7 a |
| MÉDIA | 61,0 A | 145,4 A | 149,1 A | 112,8 A | |
| 0,05 - 0,1 | | | | | |
| DAT 1 | 41,2 | 8,7 | 6,6 | 8,1 | 16,2 b |
| DAT 2 | 24,5 | 106,4 | 95 | 34,9 | 66 a |
| MÉDIA | 32,8 A | 57,5 A | 50,8 A | 23,2 A | |
| 0,1 - 0,2 | | | | | |
| DAT 1 | 21,2 | 2,4 | 2,8 | 4,7 | 7,8 b |
| DAT 2 | 42,1 | 18,4 | 16,2 | 30,8 | 26,9 a |
| MÉDIA | 31,6 A | 10,4 A | 9,5 A | 17,8 A | |
| 0,2 - 0,3 | | | | | |
| DAT 1 | 17,1 | 1,9 | 2,1 | 4,6 | 6,4 b |
| DAT 2 | 16,1 | 18,2 | 23,6 | 23,2 | 20,3 a |
| MÉDIA | 16,6 A | 10,1 A | 12,8 A | 13,9 A | |

Médias seguidas por mesma letra, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade de erro. SD - solo desnudo, VE - vegetação espontânea, AN - aveia + nabo, AE - aveia + ervilhaca.

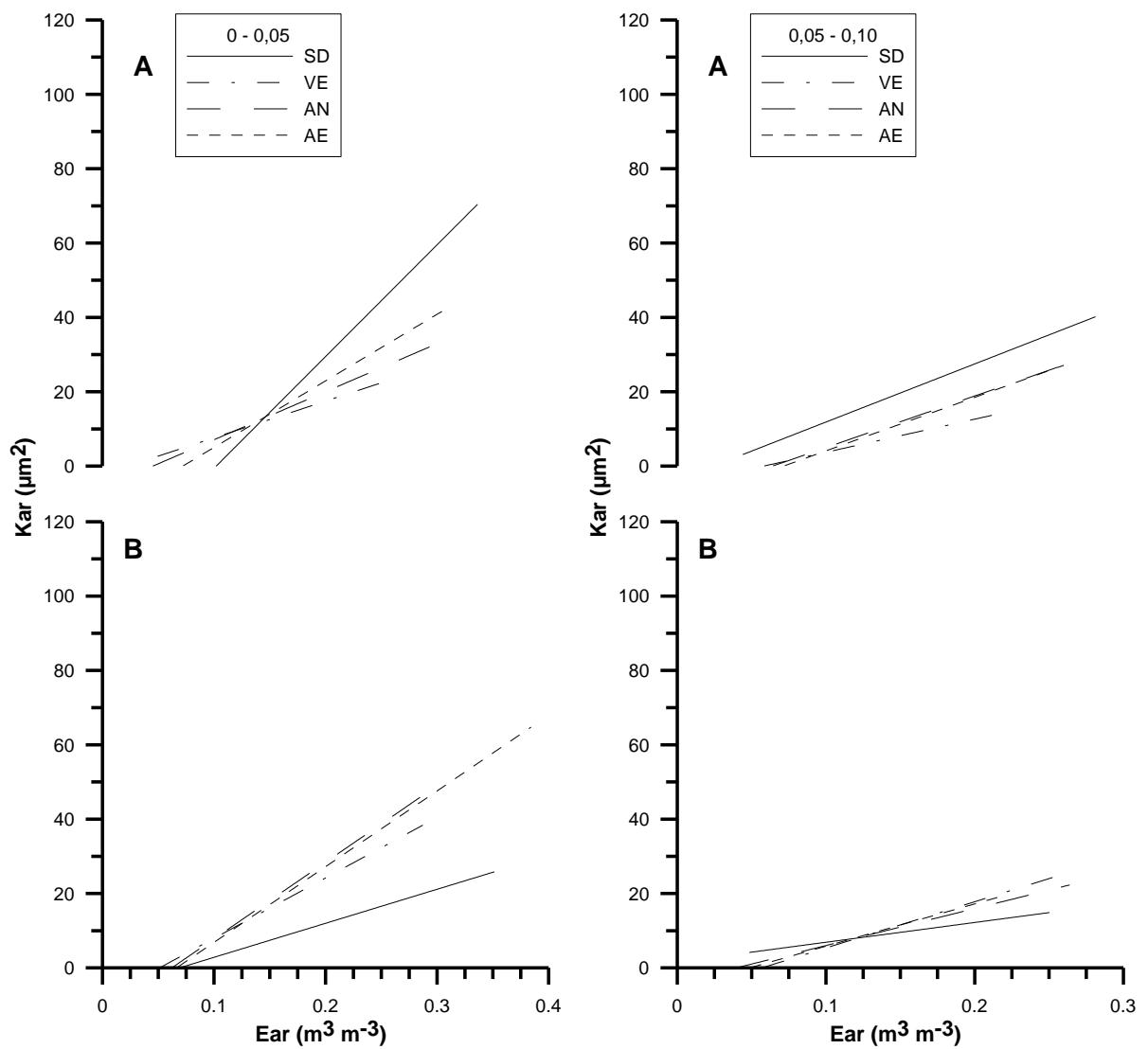
Fonte: O Autor.

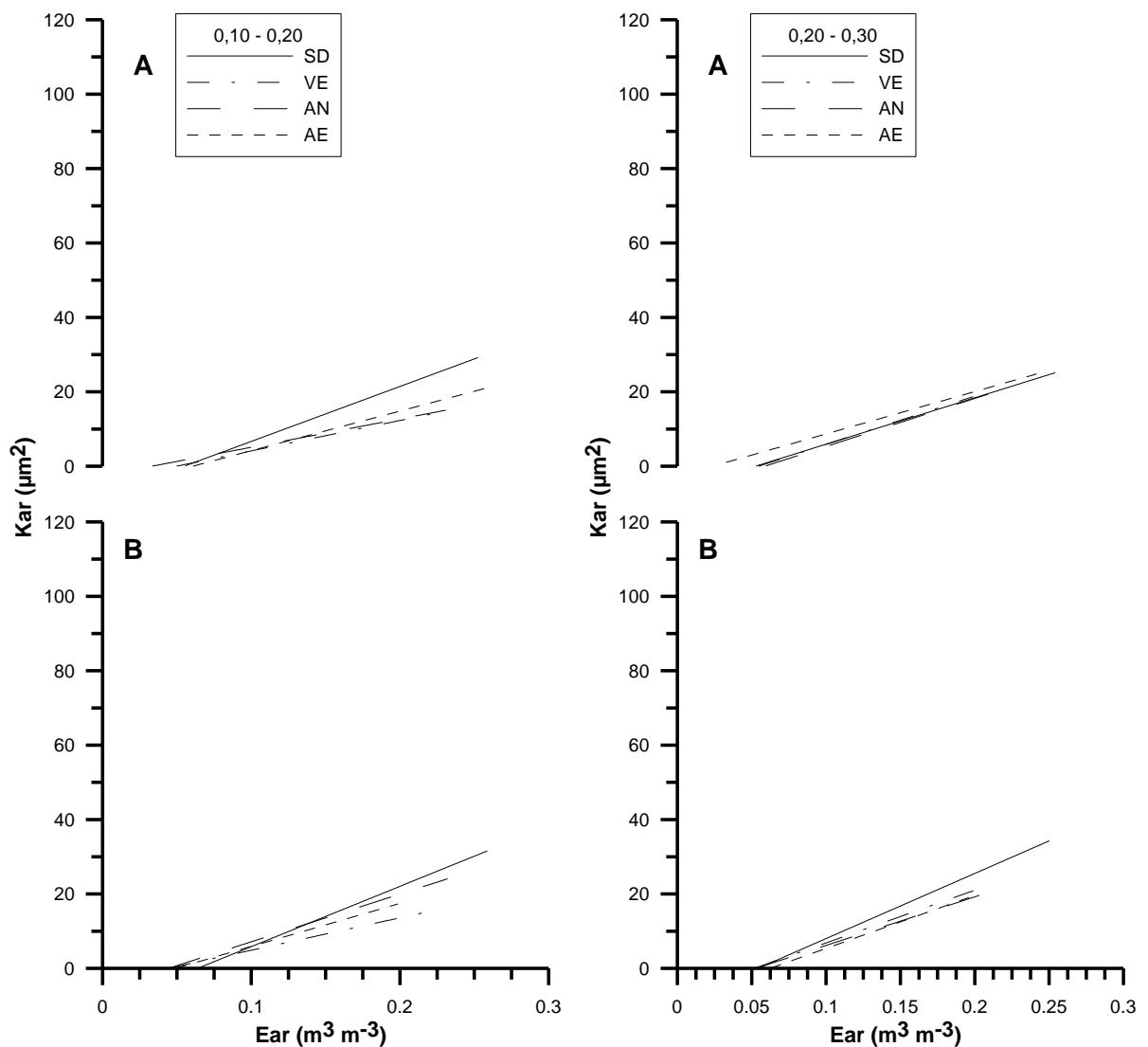
A permeabilidade ao ar é importante para indicar a facilidade que ocorrem os fluxos de gases entre o solo e a atmosfera. Os fluxos de gases estão diretamente associados ao conteúdo de água no solo, visto que em períodos de maior umidade os fluxos de gases são prejudicados. A relação entre a permeabilidade ao ar e o espaço aéreo tem sido utilizada para avaliar as diferenças na geometria, tamanho e continuidade do sistema poroso do solo (DORNER e HORN, 2009). Aumento da permeabilidade ao ar com aumento do espaço aéreo indicam melhores condições de fluxos, que está relacionado com maior continuidade, tamanho e quantidade de poros capazes de transporte de gases.

Nas duas coletas, a camada superficial do solo apresentou maior permeabilidade ao ar que as demais camadas. Conforme Sequinatto (2010), as camadas superficiais, normalmente, apresentam maior permeabilidade, devido à maior quantidade e continuidade dos poros da superfície, advindos do maior teor de matéria orgânica e atividade de raízes e de microrganismos.

A permeabilidade ao ar para os tratamentos nas duas datas avaliadas são apresentados na figura 8. No tratamento SD é possível observar uma redução na continuidade do sistema poroso. Esta redução no tratamento SD está ligada à redução da redução da porosidade total e ao aumento da microporosidade do solo, fazendo com que os poros menores ficassem preenchidos com água, reduzindo a passagem de ar (RODRIGUES et al, 2011). Na segunda avaliação, os tratamentos AE, AN e VE apresentaram os maiores valores de permeabilidade ao ar na camada de 0 a 0,1 m de profundidade. A maior Kar destes tratamentos na segunda data avaliada deve-se principalmente pela formação de poros mais estáveis em contínuos nestes tratamentos, principalmente pela decomposição de raízes e formação de bioporos (CHEN, 2010), além de melhorias na estrutura do solo pelo efeito de raízes. Nas camadas mais profundas os tratamentos se comportaram de maneira semelhante nas duas datas avaliadas.

Figura 6 - Relação entre permeabilidade ao ar e espaço aéreo para os tratamentos nas duas datas avaliadas. Data 1 (A) e data 2 (B).

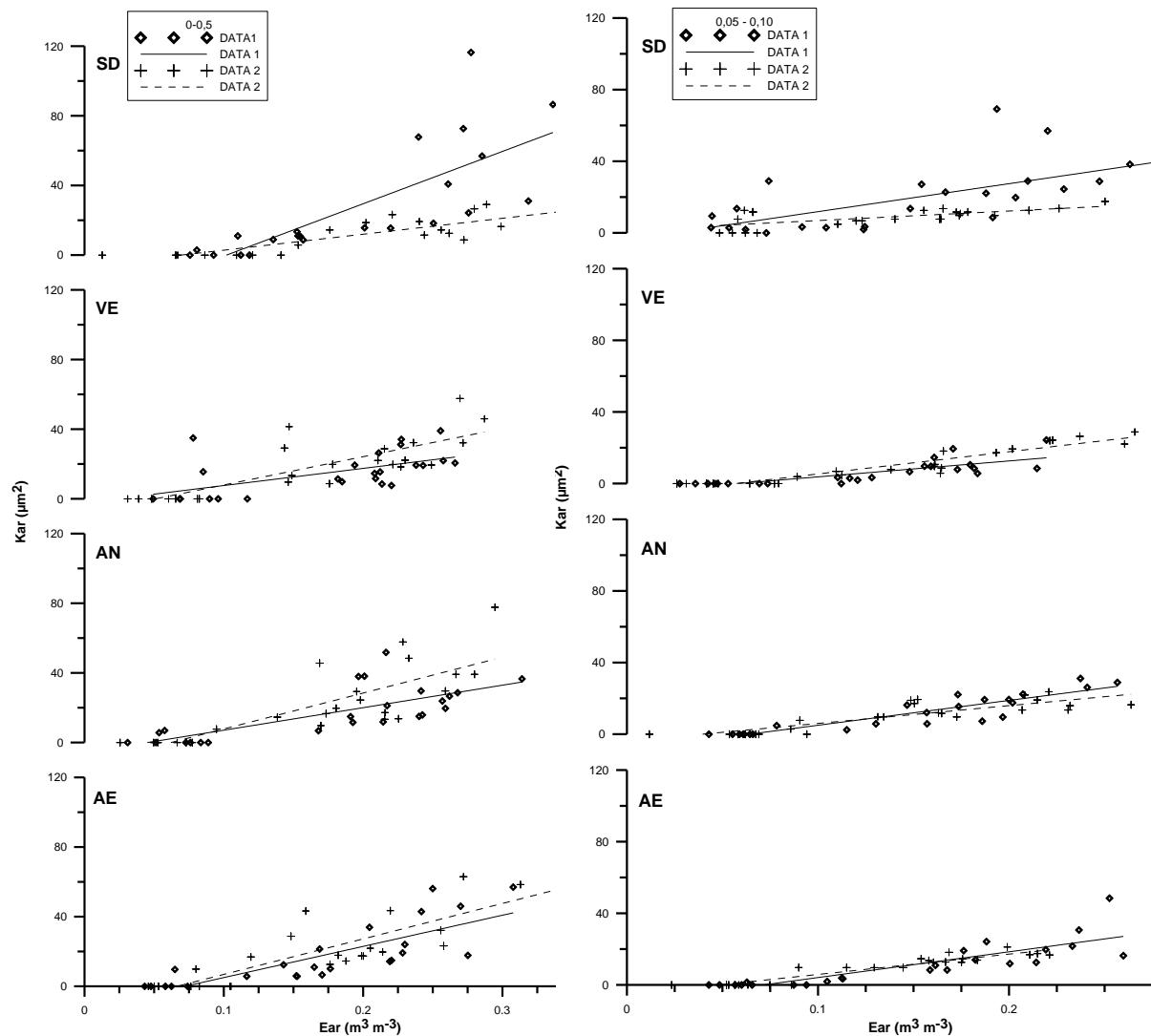


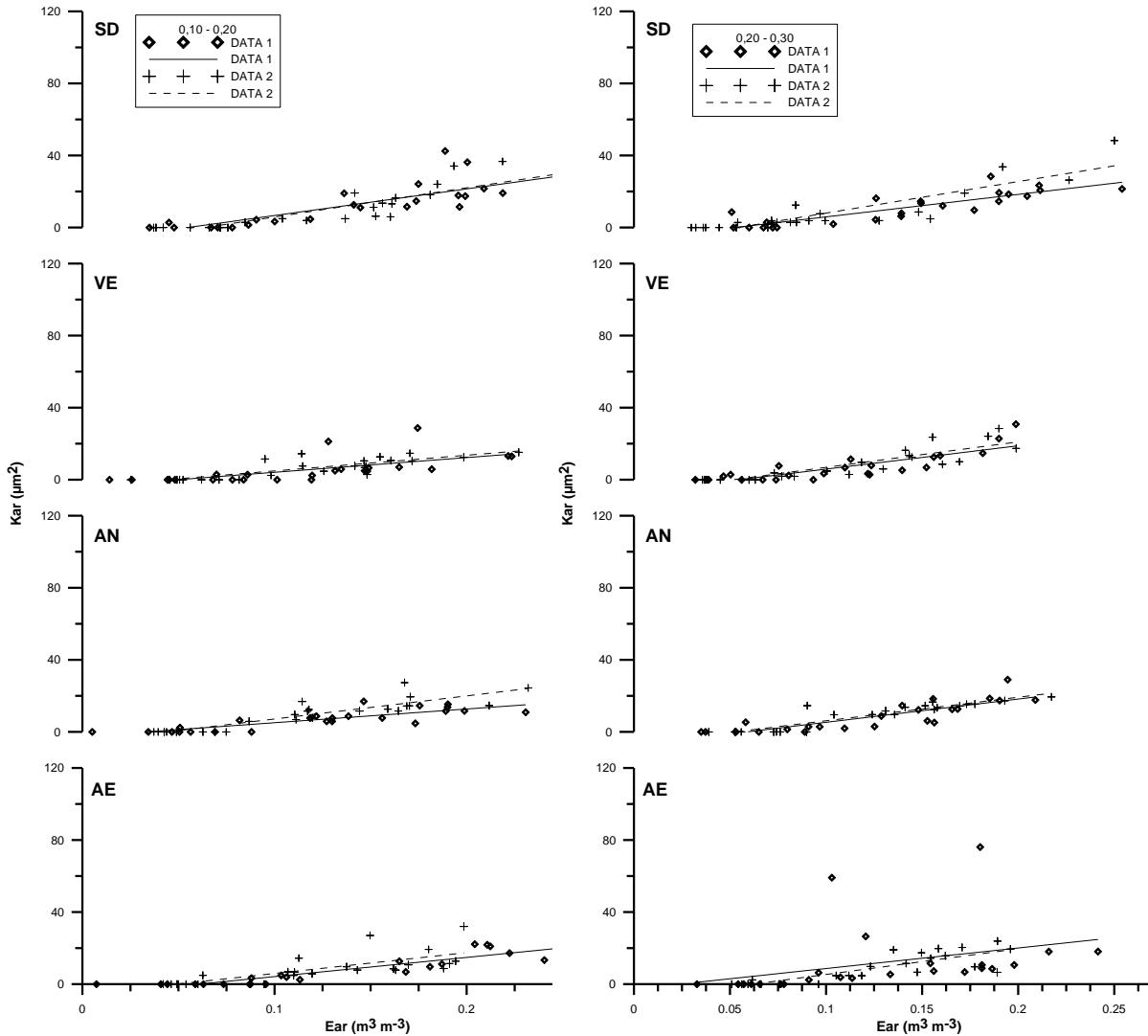


Fonte: O Autor.

Os resultados da permeabilidade do solo ao ar nas diferentes datas são apresentados na figura 9. Analisando as datas de coletas para os tratamentos avaliados, ocorreu uma redução da permeabilidade ao ar na camada de 0 a 0,1 m de profundidade no tratamento SD. Esta redução deve-se principalmente a redução da quantidade e continuidade dos poros neste tratamento, além do efeito do selamento superficial ocasionado pelo impacto da gota da chuva. Nos outros tratamentos é possível observar um aumento da permeabilidade ao ar nas camada de 0 a 0,1 m de profundidade. Na camada de 0,1 a 0,3 m de profundidade não ocorreram alterações no fluxo de ar entre as datas avaliadas.

Figura 7 - Relação entre permeabilidade ao ar e espaço aéreo para manejos de cobertura do solo. SD - solo desnudo; VE - vegetação espontânea; NA - aveia e nabo; AE - aveia e ervilhaca.





Fonte: O Autor.

4.1.3 Estabilidade de agregados em água

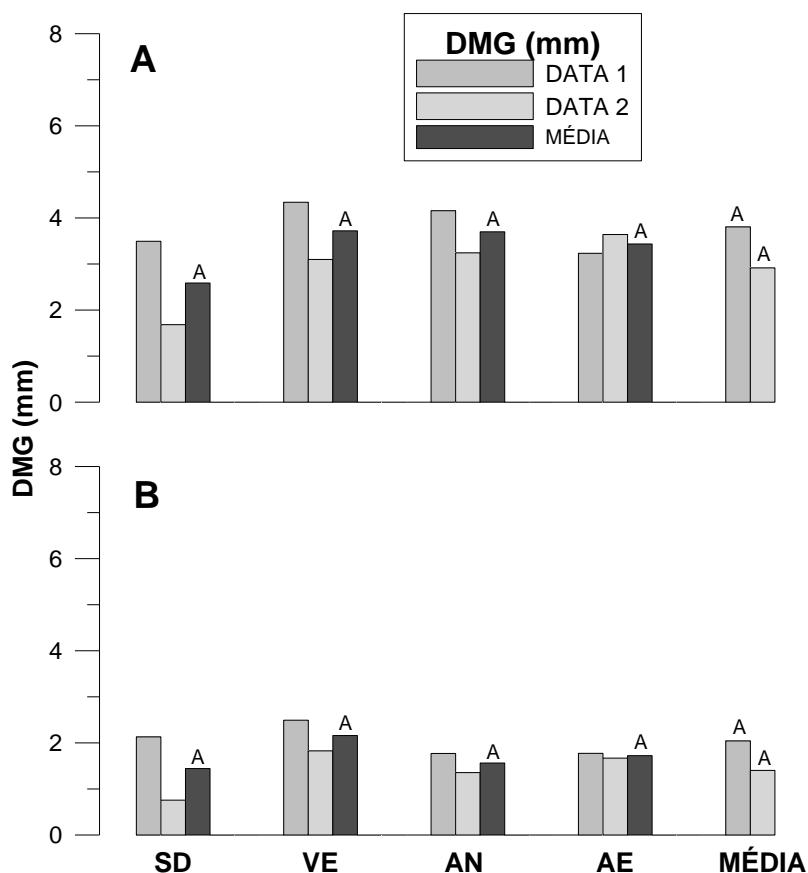
A estabilidade de agregados em água expressa através do diâmetro médio geométrico e do diâmetro médio ponderado são apresentados nas figuras 11 e 12.

Não foram observadas diferenças tanto no DMG quanto no DMP após um ciclo de plantas de cobertura entre os tratamentos e as datas avaliadas. A utilização de plantas de cobertura em apenas um ciclo não foi eficiente em aumentar a estabilidade de agregados em relação a vegetação espontânea e ao solo desnudo. Isso se deve, principalmente, ao elevado estágio de agregação que o solo se encontrava na primeira data de avaliação, já que não foi realizado preparo de solo para a implantação das culturas.

Embora não significativa, a redução tanto do DMG quanto do DMP na data 2 deve-se principalmente a redução no tratamento SD e VE. É possível verificar que apenas no tratamento AE ocorreu melhoria na agregação do solo na camada de 0 a 0,05 m. Esta melhoria se deve principalmente ao efeito das raízes das plantas sobre a formação e estabilidade de macroagregados (TISDALL e OADES, 1979).

Chieza (2010), Sainju et al (2003) e Albuquerque et al (2005) também não encontraram diferença no DMG de agregados para diferentes plantas de cobertura associadas ao cultivo de milho. Canqui et al (2011) encontraram resultados positivos do diâmetro médio geométrico com a introdução de plantas de cobertura do solo, onde reportam aumento em 80 % em estudo conduzido por longo prazo (após 15 anos).

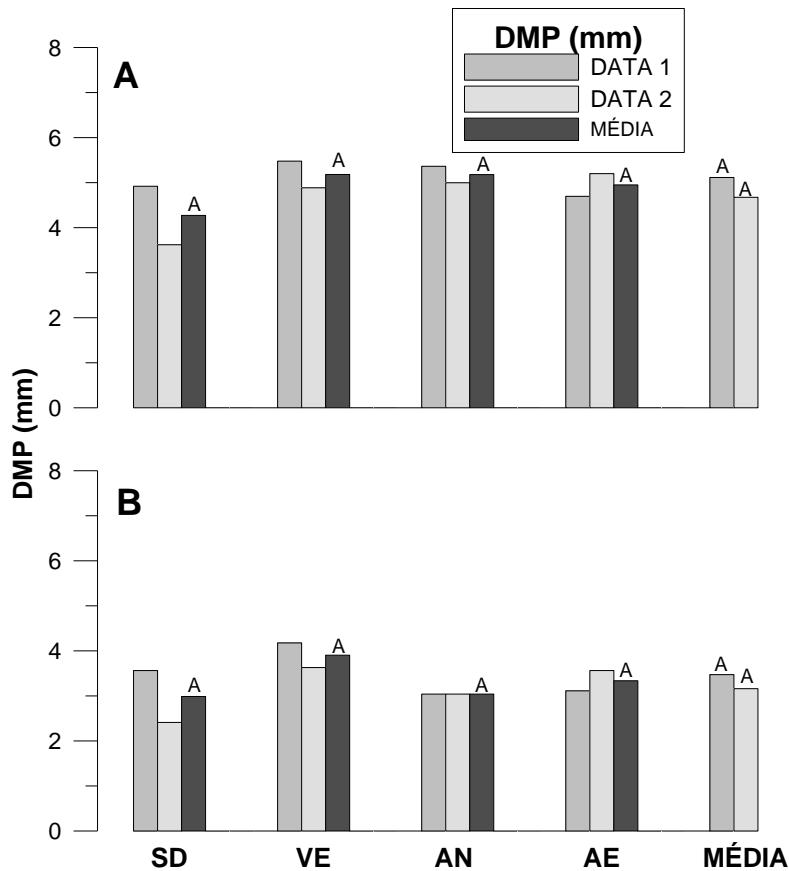
Figura 8 - Diâmetro médio geométrico de agregados em sistemas de manejo cobertura do solo na primeira data de avaliação (A) e na segunda data de avaliação (B). Santa Maria, 2016.



* Médias dos tratamentos, para cada data de avaliação, e médias das datas de avaliação não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade de erro. . SD - solo desnudo, VE - vegetação espontânea, AN - aveia + nabo, AE - aveia + ervilhaca.

Fonte: O Autor

Figura 9 - Diâmetro médio ponderado de agregados em sistemas de manejo cobertura do solo na primeira data de avaliação (A) e na segunda data de avaliação (B). Santa Maria, 2016.



* Médias dos tratamentos, para cada data de avaliação, e médias das datas de avaliação não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade de erro. . SD - solo desnudo, VE - vegetação espontânea, AN - aveia + nabo, AE - aveia + erva-lhaca.

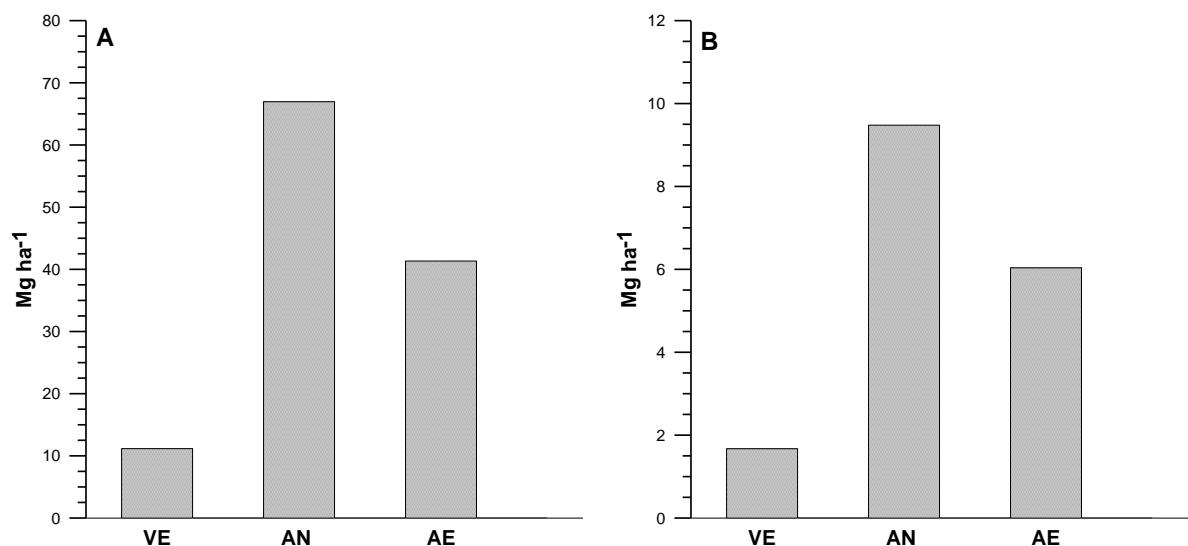
Fonte: O Autor.

4.1.4 Produção de massa úmida e massa seca

A produção de massa úmida (MU) e massa seca (MS) é apresentada na figura 13. O consórcio entre aveia e nabo produziu a maior biomassa, tanto seca quanto úmida, seguido do consórcio de aveia e erva-lhaca e a menor biomassa foi no tratamento com vegetação espontânea. A produção de matéria seca foi superior ao descrito por Giacomini et al (2003), onde trabalhando em um mesmo solo os autores alcançaram 5,66 e 4,62 Mg ha⁻¹ de matéria seca (produção máxima em três anos de cultivo).

É importante destacar a maior capacidade de produção de biomassa pelas plantas de cobertura em relação ao tratamento vegetação espontânea. Enquanto o consórcio de aveia e nabo atingiu produção de mais de 9 Mg ha⁻¹, a vegetação espontânea não atingiu 2 Mg ha⁻¹, o que demonstra a importância da inclusão de plantas de cobertura no período de outono/inverno em sistemas de produção visando a proteção do solo.

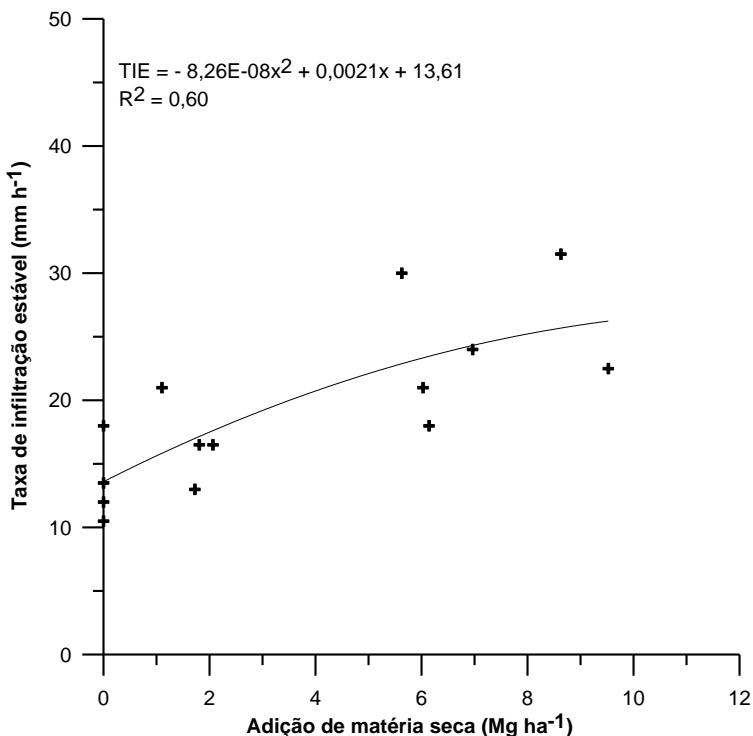
Figura 10 - Produção de massa úmida e massa seca de diferentes plantas de cobertura do solo. Santa Maria, RS.



Fonte: O Autor.

Ao relacionar os dados de produção de matéria seca pelas culturas com a infiltração de água no solo, observa-se que com aumento do conteúdo de matéria seca aportado ao sistema ocorre uma tendência de aumento na taxa de infiltração estável de água no solo. Maiores aportes de MS no tratamento AN quanto no AE refletiu em maiores valores de TIE no solo, o que ocorre devido a formação de bioporopos pelas raízes quando inicia a decomposição quanto pelo aporte de C, que ocasiona melhorias na estrutura do solo.

Figura 11 - Relação entre massa seca produzida por plantas de cobertura e infiltração de água no solo. Santa Maria, RS.

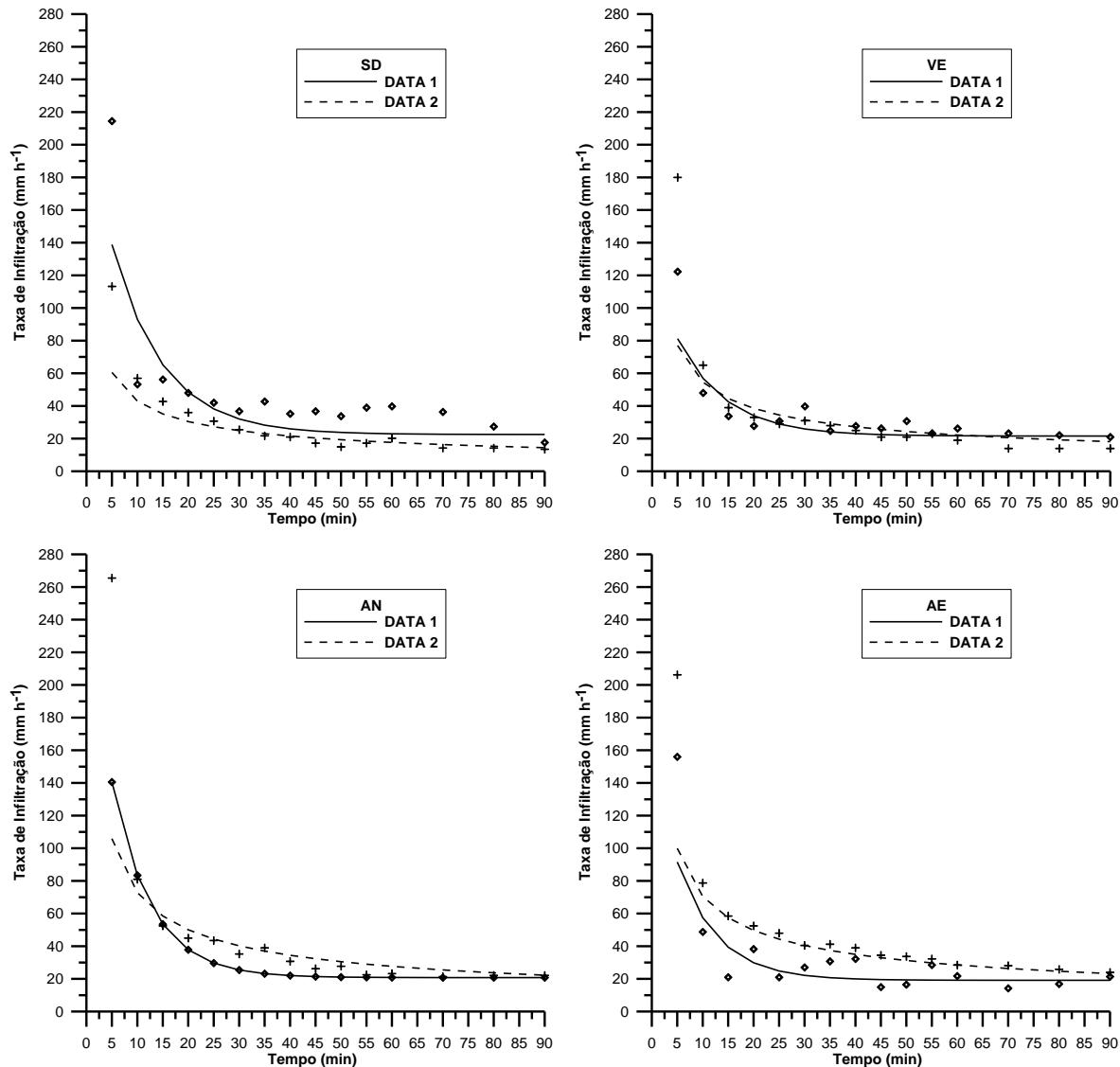


4.1.5 Infiltração de água no solo

As curvas de infiltração de água no solo para as duas datas avaliadas são apresentadas na figura 13. Nos tratamentos SD e VE verificou-se uma redução de 17,6 mm h⁻¹ para 13,5 mm h⁻¹ e 21 mm h⁻¹ para 14 mm h⁻¹ respectivamente. Nos tratamentos AN e AE ocorreu a manutenção com pequeno acréscimo na TIE, passando de 20,7 mm h⁻¹ para 22,13 mm h⁻¹ no tratamento AN e de 21,3 mm h⁻¹ para 24 mm h⁻¹ no tratamento AE. É possível observar que há uma tendência de aumento TIE com a introdução de plantas de cobertura, diferente do que ocorre quando se mantém o solo desnudo.

A redução na infiltração de água no tratamento SD deve-se principalmente ao selamento superficial que ocorre na superfície do solo, o que dificulta a infiltração de água no solo. Outros autores , como Alves e Cabeda (1999) e Lanzanova et al (2010) também observaram redução na infiltração de água em solo descoberto.

Figura 12 - Taxa de infiltração de água no solo em sistemas de manejo cobertura do solo para diferentes datas de avaliação. Santa Maria, RS.

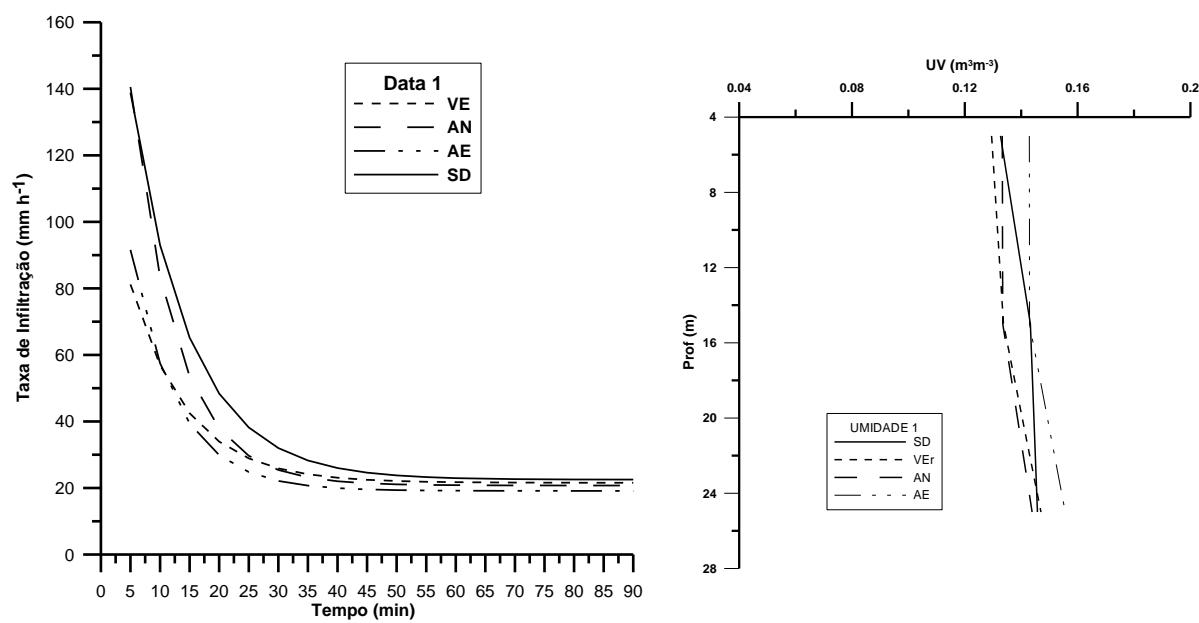


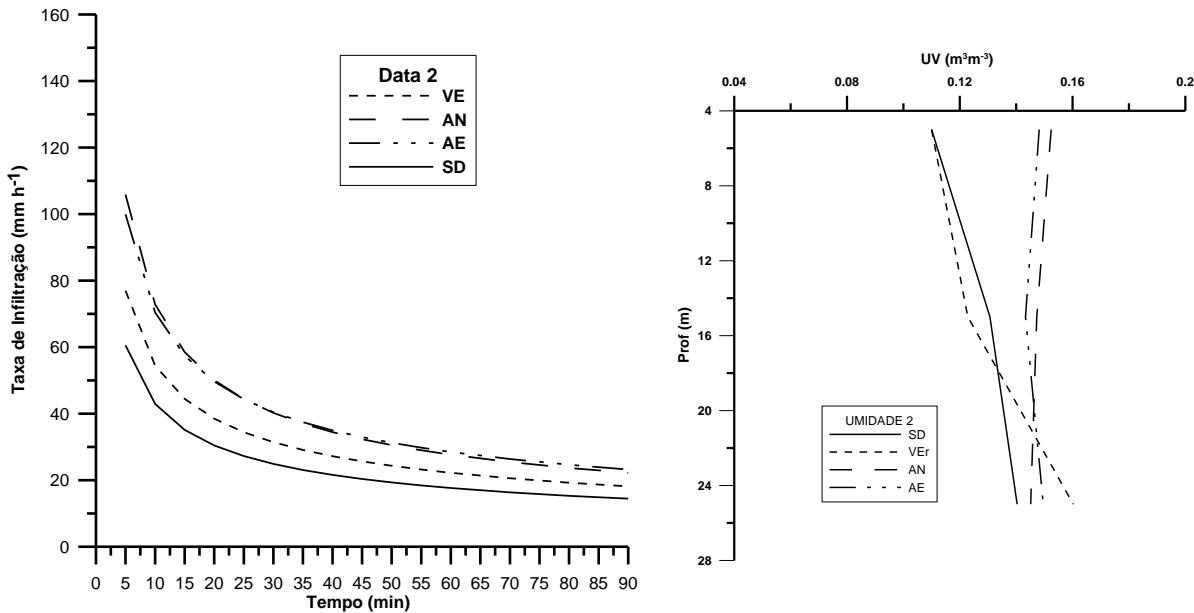
SD - solo desnudo; VE - vegetação espontânea; NA - aveia e nabo; AE - aveia e ervilhaca
Fonte: O Autor.

A infiltração de água no solo para os diferentes tratamentos é apresentado na figura 14. Na primeira data de avaliação ambos os tratamentos apresentam TIE próximas, ficando acima de 20 mm h^{-1} . Na segunda data de avaliação o tratamento SD apresentou o menor valor de TIE, $13,5 \text{ mm h}^{-1}$, e os tratamentos AE e AN 24 mm h^{-1} e $22,1 \text{ mm h}^{-1}$ respectivamente. A TIE no tratamento VE ficou próximo ao tratamento SD, sendo apenas $0,5 \text{ mm h}^{-1}$ superior, enquanto nos tratamentos com plantas de cobertura os valores de TIE foram $10,5 \text{ mm h}^{-1}$ e $8,6 \text{ mm h}^{-1}$ acima do tratamento SD.

Maiores valores de TIE nos tratamentos com plantas de cobertura ocorrem principalmente devido a proteção pelo dossel ao impacto da gota da chuva, reduzindo assim o selamento superficial e permitindo uma maior taxa de infiltração de água. Outro fator importante é a melhoria da estrutura do solo, embora as demais avaliações não apresentaram diferença, é possível observar melhorias nas propriedades físico-hídricas do solo, principalmente redução da densidade nas camadas superficiais, aumento da porosidade e da continuidade de poros nos tratamentos com a introdução de plantas.

Figura 13 - Taxa de infiltração de água no solo em sistemas de manejo cobertura do solo para as duas datas avaliadas. Santa Maria, RS.





SD - solo desnudo; VE - vegetação espontânea; NA - aveia e nabo; AE - aveia e ervilhaca

Fonte: O Autor.

Nicoloso et al (2008) encontraram aumentos na faixa de 46,6 % na infiltração de água no solo com a utilização de aveia e nabo consorciado em semeadura direta em comparação a utilização de apenas aveia.

Avaliando diferentes espécies de plantas de cobertura, Forlunso (1992), em um solo semelhante ao deste trabalho, obtiveram resultados positivos com a introdução de plantas de cobertura do solo, indicando aumento de $7,8 \text{ mm h}^{-1}$ em solo desnudo para $18,8 \text{ mm h}^{-1}$ com a utilização de trevo. Os autores indicam a formação de selamento superficial como a principal causa para redução da infiltração de água no solo.

Embora os valores de TIE para o tratamento SD estejam próximas ao tratamento VE, erroneamente poderia se inferir que não é necessário manter o solo coberto para manutenção de propriedades físico-hídricas do solo. Ao mesmo tempo que a água tem mais dificuldade de infiltrar no tratamento VE, a vegetação dificulta o escoamento, aumentando o tempo de permanência de água na parcela e contribuindo para o aumento da infiltração (LANZANOVA et al, 2010).

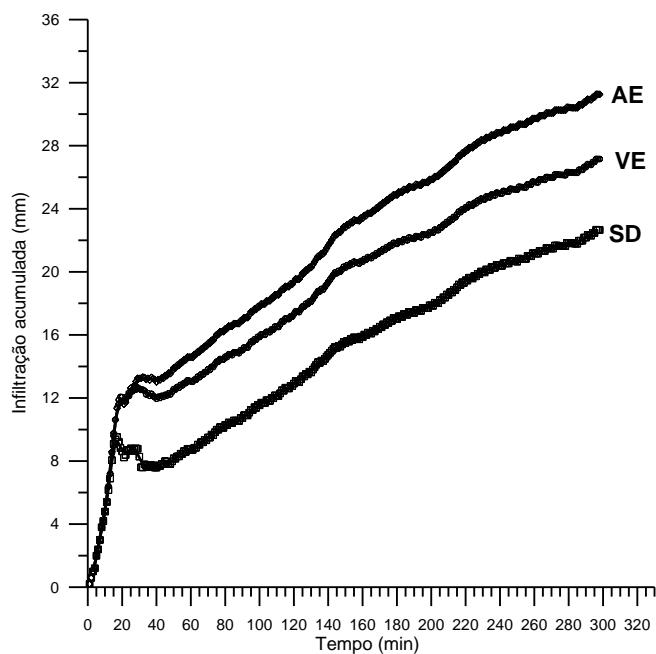
4.2 RELAÇÃO ENTRE MÉTODOS PONTUAIS DA AVALIAÇÃO DA INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO COM A INFILTRAÇÃO SOB CHUVA NATURAL

4.2.1 Infiltração de água no solo

Três sistemas de manejo com diferentes plantas de cobertura semeadas sem preparo do solo foram avaliados neste estudo, sendo eles: solo desnudo (SD), consórcio de aveia e ervilhaca (AE) e vegetação espontânea de inverno (VE). A estimativa da infiltração de água no solo foi realizada em um evento que ocorreu no dia 31/10, poucos dias antes das avaliações com os métodos pontuais (05/11).

A infiltração acumulada com chuva natural (Figura 15) foi obtida entre a diferença da precipitação e o escoamento. Três segmentos podem ser observados na figura 4, o primeiro segmento (0 a 15 min) a taxa de infiltração é igual a precipitação. No segundo segmento ocorre uma redução da infiltração acumulada, o que acontece devido a estratégia de cálculo utilizada. Como a infiltração acumulada foi calculada entre a precipitação e o escoamento correspondente ao mesmo tempo, a taxa de escoamento pode ser maior que a taxa de precipitação em determinados períodos, ocasionando redução na infiltração acumulada. Fisicamente isto é incoerente, mas ocorre devido a defasagem de tempo entre o início do escoamento e a medição, o que ocorre devido ao tempo que a água demora para chegar da parte superior da parcela até a calha coletora e desta para o interior da caixa. O terceiro segmento (<80 min) corresponde a taxa de infiltração estável no solo, onde para o tratamento SD corresponde a $0,126 \text{ mm min}^{-1}$, para o tratamento VE $0,158 \text{ mm min}^{-1}$ e para o tratamento AE $0,17 \text{ mm min}^{-1}$.

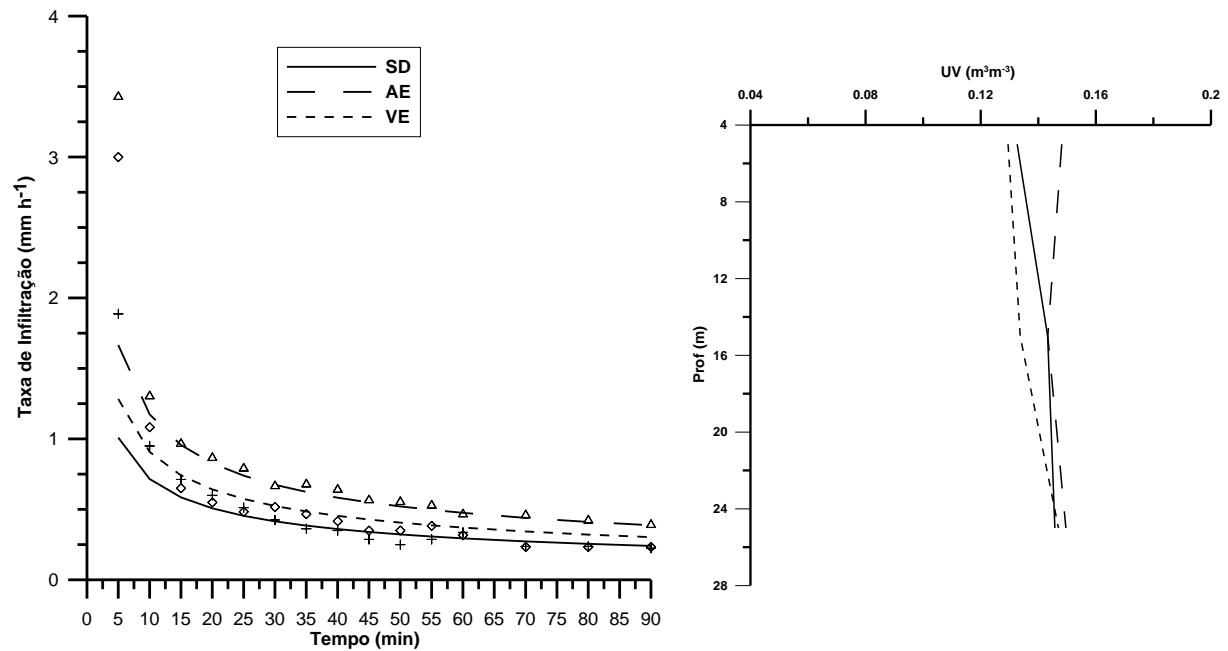
Figura 14 - Infiltração acumulada com chuva natural. Santa Maria, RS.



Fonte: O Autor.

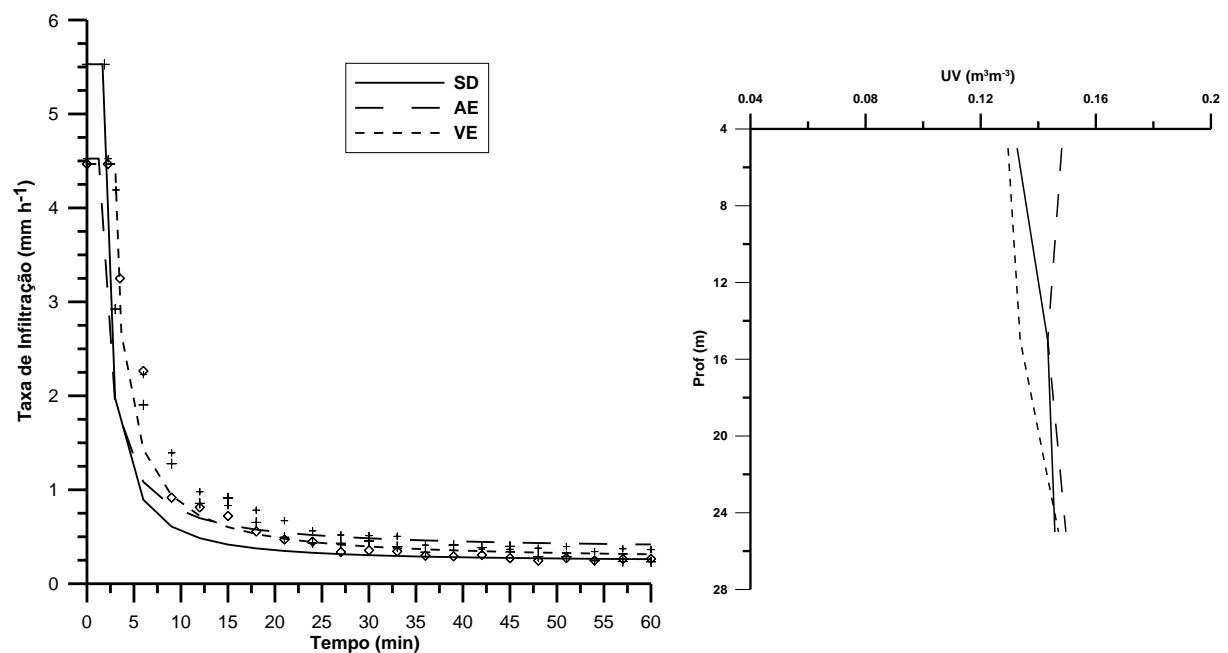
A taxa de infiltração determinada utilizando os métodos pontuais são apresentadas nas figuras 16 e 17. A taxa de infiltração estável determinada pelo método do duplo anel foi $0,26 \text{ mm min}^{-1}$ para o tratamento SD; $0,32 \text{ mm min}^{-1}$ para o tratamento VE e $0,41 \text{ mm min}^{-1}$ para o tratamento AE. Já para o método de Cornell a taxa de infiltração estável para foi de $0,23$; $0,26$ e $0,36 \text{ mm min}^{-1}$ para os tratamentos SD, VE e AE respectivamente. Para o valor de taxa de infiltração estável considerou-se a média dos três últimos valores obtidos para ambos os testes.

Figura 15 - Infiltração de água determinada pelo método do duplo anel. Santa Maria, RS.



Fonte: O Autor.

Figura 16 - Infiltração de água no solo determinada pelo método de Cornell. Santa Maria, RS.



Fonte: O Autor.

Observa-se que a taxa de infiltração determinada pelo método do duplo anel apresenta uma taxa de infiltração superior à do método de Cornell em todos os tratamentos avaliados, variando entre 13 e 23 % a mais. A maior taxa de infiltração observada no infiltrômetro de duplo anel deve-se a presença de uma carga hidráulica na superfície do solo, o que condiciona um aumento na infiltração. Estes resultados são semelhantes aos encontrados por Zwirtes et al (2013), onde os autores observaram que em um Latossolo Vermelho, o método de duplo anel superestimou a taxa infiltração estável de água em 28 % em relação ao infiltrômetro de Cornell.

As TIEs determinada pelos métodos pontuais foram superiores às determinadas pelo método com chuva natural. No tratamento SD os métodos pontuais foram 2,1 e 1,8 vezes superiores, respectivamente, ao método com chuva natural, ao passo que no tratamento VE, 2,5 e 2,3 vezes superiores e para o tratamento AE, 1,9 e 1,5 vezes superiores a TIE determinada com chuva natural. A superestimação da TIE pelos métodos pontuais está associada ao aumento do bulbo de melhoramento do solo, ocasionado por desvios laterais nas linhas de fluxo. Segundo Chowdary et al (2006), a componente lateral varia de 31 a 67 % em anel único e 11 a 12 % quando utilizado duplo anel. Esta variação explica também a semelhança entre os métodos de avaliação, onde a componente lateral no caso do método de Cornell influencia mais que no método de duplo anel, porém a carga hidráulica mantida no método de duplo anel afeta a determinação da infiltração.

Outra fonte de subestimação dos métodos pontuais é a área que estes métodos representam. Como há uma alta variabilidade espacial da infiltração de água no solo e o método com chuva natural abrange uma área maior de avaliação, é esperado que esta represente melhor a infiltração na escala de parcela que os métodos pontuais.

Rao et al (1998) encontraram valores para TIE que variaram de 5 a 6 vezes superiores quando comparados o método do duplo anel e de permêmetro de disco com o método com chuva natural em um solo desnudo com 72 % de areia e 2 % de declividade. Os autores afirmam que a formação de encrustamento superficial quando se avalia a TIE com chuva natural seja a principal causa da TIE ser superestimada quando se utilizam os métodos pontuais.

Levien et al (2000) em estudo avaliando um simulador de chuva e o método de duplo anéis encontraram valores de TIE na ordem de 5 a 10 vezes superiores quando utilizaram duplo anéis concêntricos. Sidiras e Roth (1986) encontraram em

um Latossolo valores de TIE em torno de 2,2 vezes superiores quando avaliados pelo método do duplo anel em relação a TIE avaliada com um simulador de chuva. Segundo os Autores , o selamento superficial provocado pelo impacto da gota da chuva no simulador de chuva reduz a infiltração de água no solo, já no método do duplo anel a presença de uma carga hidráulica colabora no aumento da taxa de infiltração em solos com alta infiltrabilidade.

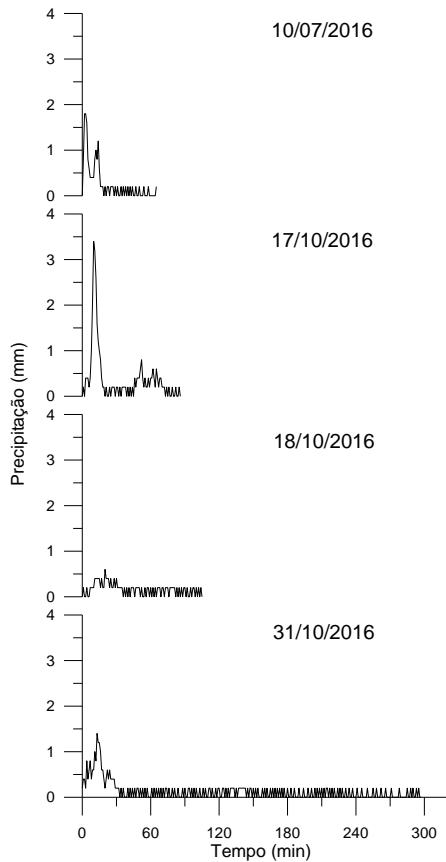
Ben-Hur (1987) encontrou diferenças similares ao comparar o infiltrômetro de anel e simuladores de chuva em Israel. O O Autor justifica a formação de encrostamento superficial com o uso do simulador e a não formação de crosta com o uso de infiltrômetro de anel como a principal causa desta diferença. Barros et al (2014) também verificaram que a infiltração determinada pelo método de anel concêntrico superestima a infiltração de água em escala de parcela ou bacia hidrográfica.

Avaliando a relação entre a taxa de infiltração determinada pelo método de duplo anel e determinado através do modelo de GAMC, Oliveira (2015), na mesma área de estudo, também verificou que a infiltração determinada pelo método de duplo anel superestimou a infiltração de água no solo. Segundo o O Autor, a presença de uma carga hidráulica na superfície do solo e o avanço do bulbo de molhamento, que está associado aos desvios laterais das linhas de fluxo, são os principais responsáveis pela superestimação da infiltração determinada por este método.

4.2.2 Estimativa do escoamento superficial de água no solo

A comparação do escoamento superficial foi realizada para quatro eventos de chuva (FIGURA 18) que geraram escoamento no período de julho a outubro. Utilizou-se na equação 10 a TIE obtida com chuva natural e com os métodos pontuais para estimar os escoamentos nos três tratamentos avaliados e comparar com o escoamento observado. Cabe ressaltar que esta estratégia de cálculo não pode ser utilizada para estimar o escoamento gerado quando não há dados de escoamento observado, pois ela só é válida após o início do escoamento. Assim, neste estudo serviu apenas para demonstrar que a TIE de água no solo é superestimada por métodos pontuais como o duplo anel concêntrico e infiltrômetro de Cornell.

Figura 17 - Precipitação para quatro eventos de chuva monitorados. Santa Maria, RS.

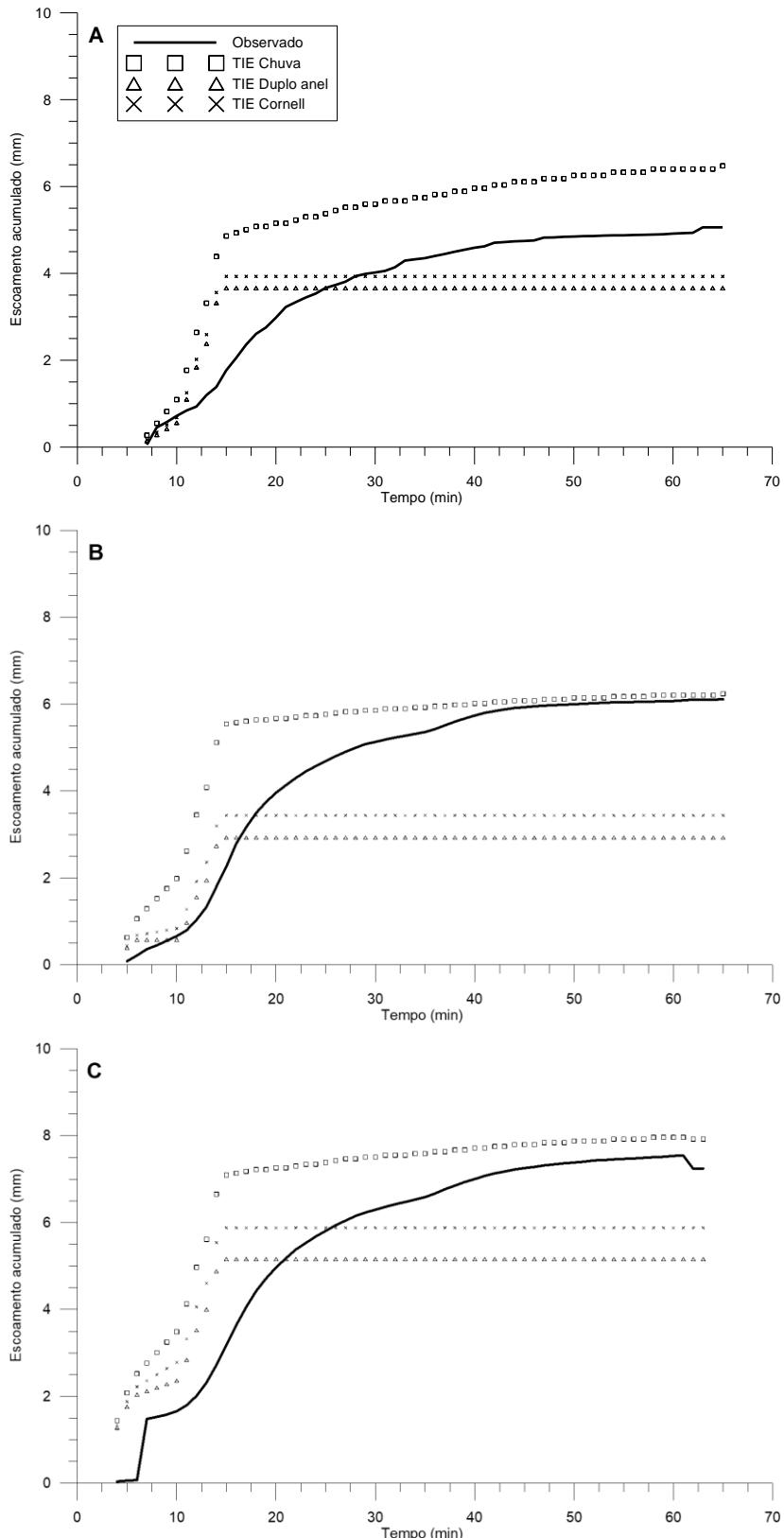


Fonte: O Autor.

Para o evento do dia 10/07/2016 observa-se que no tratamento SD o escoamento estimado com a TIE determinada pela chuva natural superestimou o escoamento observado (FIGURA 19). Esta superestimação ocorreu devido este evento ser o primeiro evento após o início do experimento, momento em que o selamento superficial pelo impacto da gota da chuva ainda era pequeno. Para este evento, o escoamento estimado usando a TIE dos métodos aproximou mais dos valores observados, isto porque a TIE dos métodos pontuais foi de 2 e 1,8 vezes superior a TIE com chuva, o que reduziu o escoamento estimado.

Para os tratamentos AE e VE o escoamento estimado utilizando a TIE com chuva natural aproximou-se mais do escoamento observado que quando utilizando a TIE determinada pelos métodos pontuais. Utilizando esta estratégia de cálculo é possível observar que ocorre uma superestimativa da TIE quando utilizado métodos pontuais.

Figura 18 - Escoamento estimado e observado para o evento do dia 10/07/2016 para os tratamentos solo desnudo (A), aveia e ervilhaca (B) e vegetação espontânea (C).

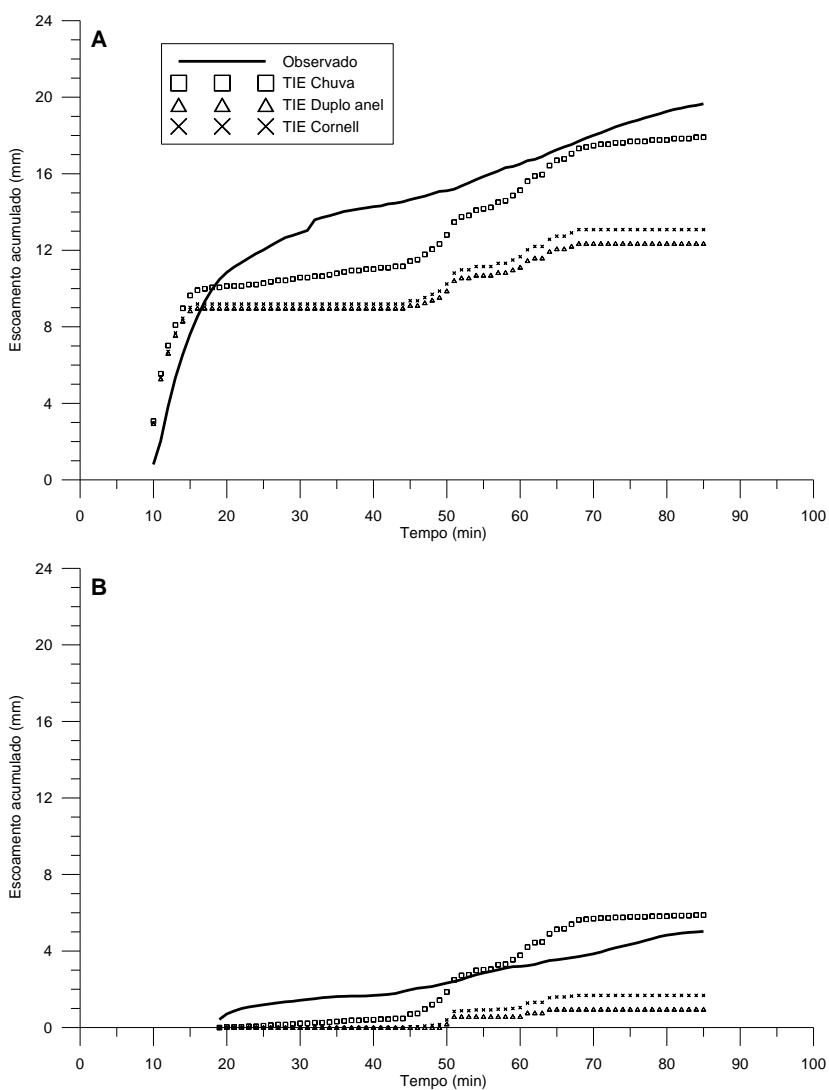


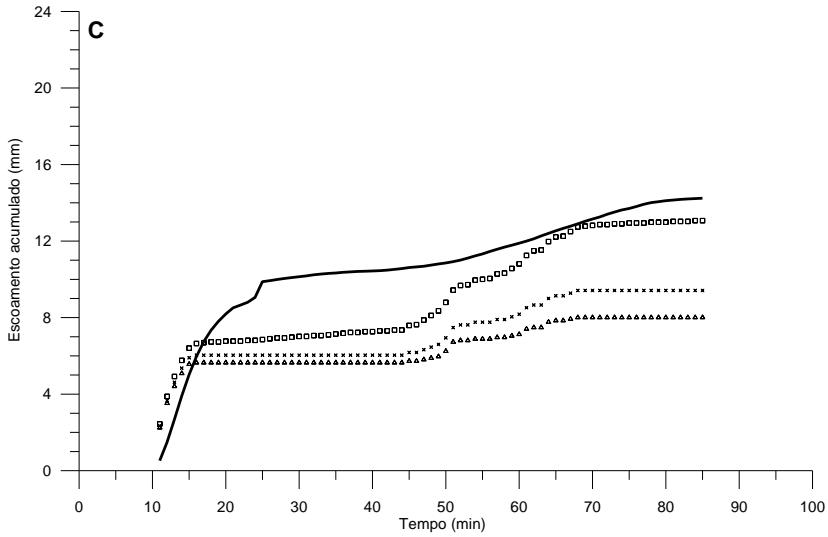
* Precipitação acumulada de 17,8 mm, taxa de precipitação máxima de 1,8 mm min⁻¹.
Fonte: O Autor.

Para o evento do dia 17/10/16 (FIGURA 20), utilizando a TIE com chuva natural, o escoamento estimado aproximou-se do observado em todos os

tratamentos avaliados. A subestimativa do escoamento nos tratamentos SD e VE ocorreu possivelmente devido a capacidade de infiltração do solo ser superior a TIE utilizada para estimar o escoamento, visto que a TIE utilizada no cálculo ocorre apenas para solo saturado.

Figura 19 - Escoamento estimado e observado para o evento do dia 17/10/2016 para os tratamentos solo desnudo (A), aveia e ervilhaca (B) e vegetação espontânea (C).

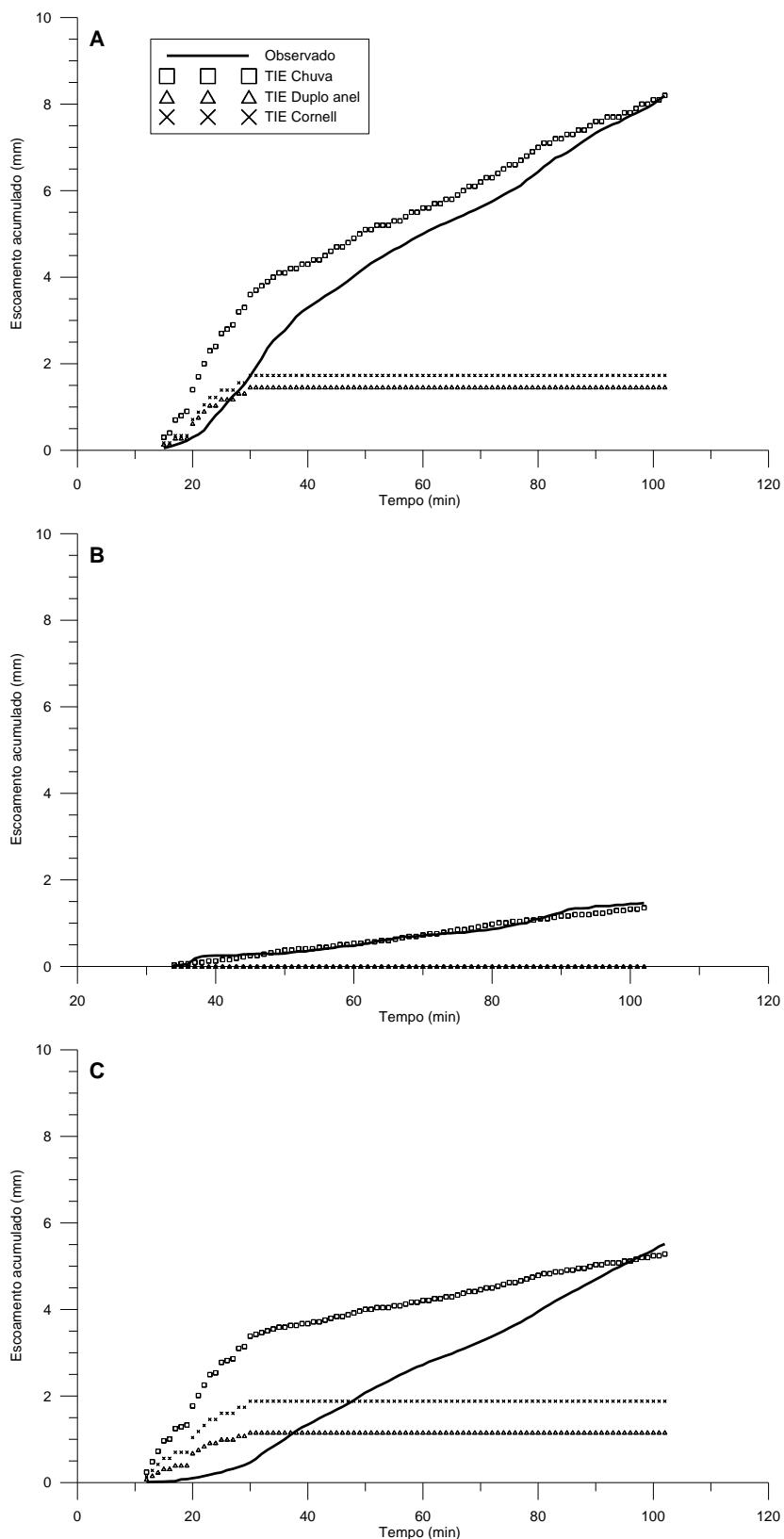




* Precipitação acumulada de 33,4 mm, taxa de precipitação máxima de 3,4 mm min⁻¹.
Fonte: O Autor.

No dia 18/10/16 (FIGURA 21), o escoamento observado foi elevado, chegando a quase 50 % do volume precipitado. Isto ocorreu devido as elevadas precipitações ocorridas no dia 17/10/2016, estando o solo saturado. Nos tratamentos SD e VE, o comportamento do escoamento utilizando a TIE com chuva natural foi semelhante ao observado, porém nota-se um adiantamento no escoamento. Este adiantamento ocorre devido ao atraso no escoamento (*time delay*), o que faz com que os valores estimados afastam-se do observado durante o período de ocorreu escoamento, o que não é considerado na equação 10, utilizada para a estimativa do escoamento. A equação assume que não existe tempo de escoamento (*time delay*), na realidade, este existe um tempo para que a água percorre a parcela e chegue na calha coletora, ocasionando este atraso no escoamento (Rao et al, 1998). No tratamento AE a cobertura do solo faz com que o escoamento permaneça praticamente constante durante o evento, o que faz com que os escoamentos medidos e estimados sejam semelhantes.

Figura 20 - Escoamento estimado e observado para o evento do dia 18/10/2016 para os tratamentos solo desnudo (A), aveia e ervilhaca (B) e vegetação espontânea (C).



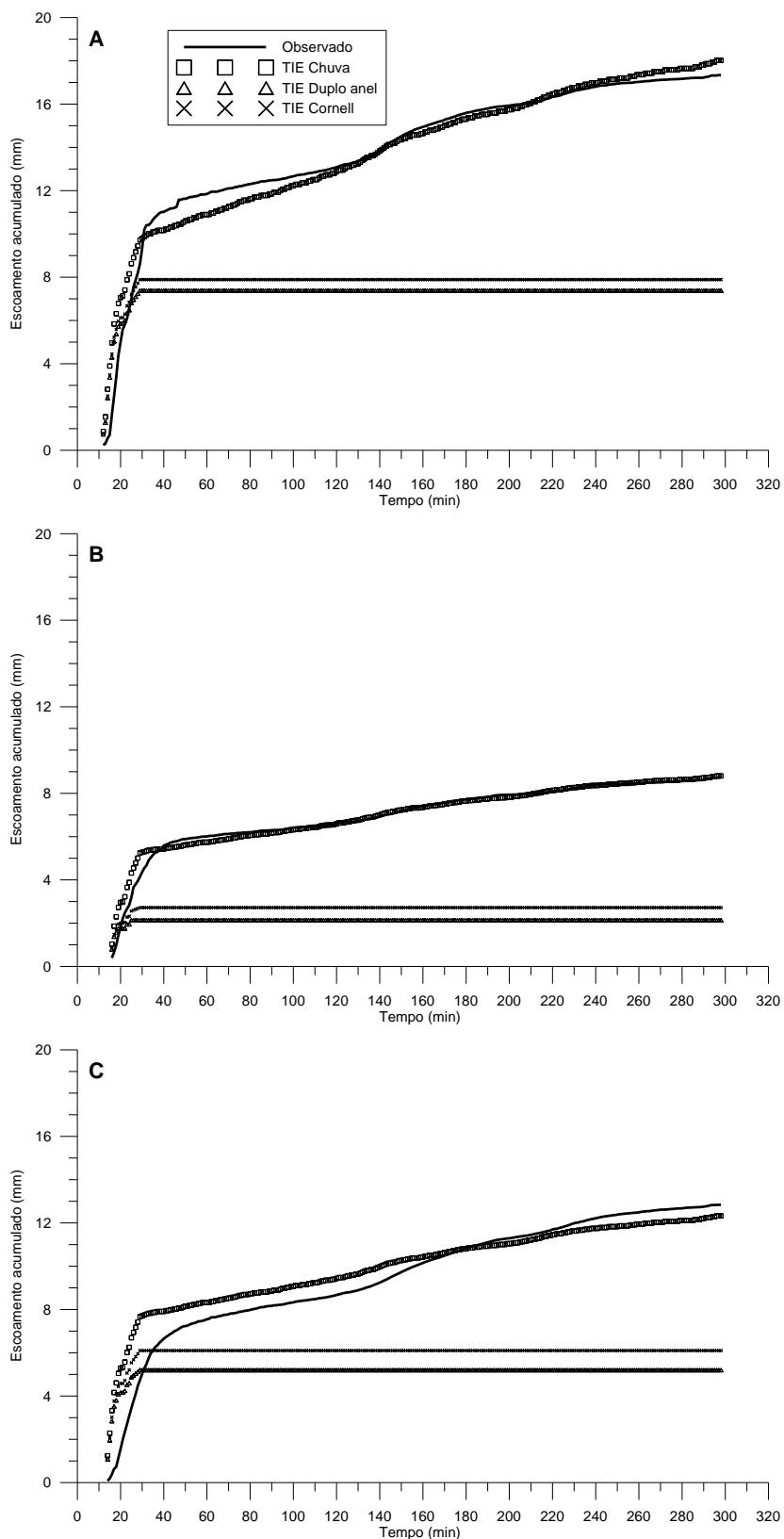
* Precipitação acumulada de 17,2 mm, taxa de precipitação máxima de 0,6 mm min⁻¹.
Fonte: O Autor.

Ao utilizar a TIE determinada pelos métodos pontuais, em todos os tratamentos avaliados o escoamento foi subestimado, novamente indicando que estes métodos superestimam a infiltração de água no solo em ambas as condições. É importante destacar que, embora o escoamento observado no tratamento AE foi pequeno, quando realizada a estimativa do escoamento utilizando a TIE determinada por métodos pontuais, observa-se que não ocorreu escoamento.

Para o evento do dia 31/10/16 (FIGURA 22), devido as características da precipitação, com precipitação condensada e constante no início do evento, os valores estimados utilizando a TIE com chuva natural e o observado foram semelhantes. A estimativa do escoamento utilizando a TIE determinada pelos métodos pontuais foi inferior ao observado em todos os tratamentos, o que ocorreu novamente devido a superestimação dos valores de TIE. Em todos os tratamentos o volume final escoado utilizando a TIE determinada com chuva natural aproximou-se do volume final observado.

No tratamento AE verificou-se melhor relação entre os valores observados e estimados com chuva natural. Isto deve-se principalmente ao fato de o escoamento e a precipitação permanecer constante após o início do escoamento. Para ambos os tratamentos, a estratégia de cálculo utilizando a equação 10 e a TIE com chuva natural, o volume final escoado estimado aproximou-se mais do observado. Embora fosse esperado observar maiores diferenças nos tratamentos com coberturas, devido principalmente ao aumento da cobertura vegetal, isto não foi observado nos escoamentos avaliados. A ocorrência de escoamentos em um curto período de tempo indica que a estratégia de cálculo utilizada é válida, porém conforme Rao et al (1998), para períodos maiores de tempo e sazonalidade de cobertura, a estratégia de cálculo não contempla esta variação e não é válida.

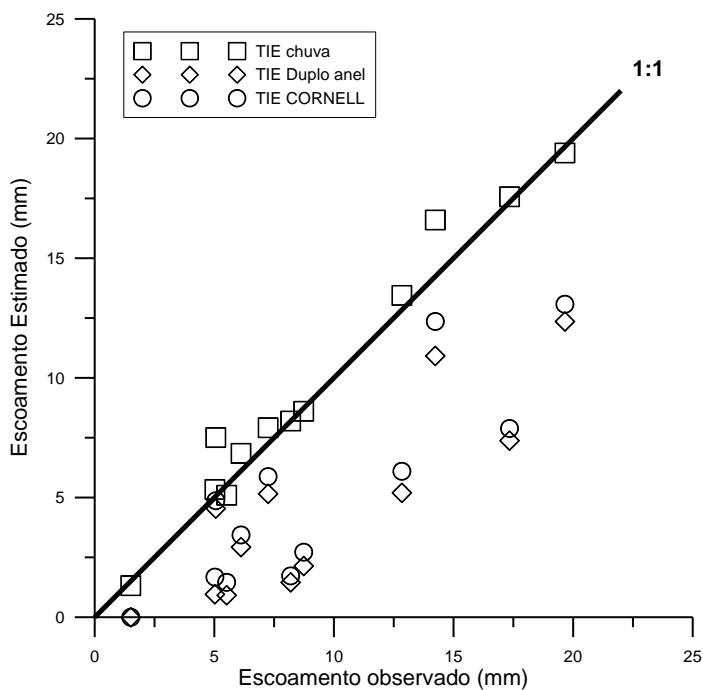
Figura 21 - Escoamento estimado e observado para o evento do dia 31/10/2016 para os tratamentos solo desnudo (A), aveia e ervilhaca (B) e vegetação espontânea (C).



* Precipitação acumulada de 40 mm, taxa de precipitação máxima de $1,4 \text{ mm min}^{-1}$.
Fonte: O Autor.

Na figura 23 é apresentada a comparação entre o escoamento total estimado e o escoamento total observado para os três métodos avaliados, em quatro eventos e nos três tratamentos. Utilizando a TIE com chuva natural os valores estimados apresentam uma boa correlação com os valores estimados, diferente de quando utilizados os valores de TIE determinada pelos métodos de duplo anel e de Cornell. É possível observar que os valores simulados utilizando os métodos pontuais subestimam o escoamento total, superestimando a infiltração de água no solo.

Figura 22 - Relação entre o escoamento estimado e o escoamento observado para os três métodos de avaliação da taxa de infiltração estável de água no solo.



Fonte: O Autor.

Como a infiltração é uma propriedade com alta variabilidade espacial, métodos que representam uma maior área de avaliação são melhores que métodos com área de avaliação restrita. Isso faz com que a infiltração de água no solo determinada utilizando a chuva natural em escala de parcela represente melhor a infiltração e o escoamento que ocorre na parcela que os métodos pontuais, que representam uma área muito menor.

Os coeficientes de desempenho indicam que em todos os tratamentos a TIE determinada com chuva natural obteve melhor desempenho que os métodos de Cornell e duplo anéis concêntrico. Os melhores desempenhos foram obtidos no tratamento sem cobertura (SD), onde o NSE chegou a ser de 0,96, indicando uma alta relação entre os valores medidos e os valores estimados quando se utiliza a TIE com chuva natural. Valores próximo a 1 demonstram que os valores simulados oferecem uma estimativa mais precisa dos valores observados. Para os dois métodos pontuais, duplo anéis e Cornell, os índices estão abaixo de 0, indicando uma estimativa ruim dos dados observados quando se utiliza estes métodos.

Valores de RSR próximo a 0 indicam que os dados simulados possibilitam uma melhor estimativa dos dados observados. Para ambas as coberturas, as melhores estimativas ocorreram quando foi utilizado valores de TIE determinados com chuva natural. Entre os métodos pontuais, o método de Cornell teve valores menores de RSR, indicando ser preferível ao método de duplo anéis concêntricos.

Tabela 7 - Coeficientes de desempenho dos métodos utilizados de determinação da TIE para a estimativa do escoamento superficial de água.

| SD | | | |
|-----|---------------|------------|---------|
| | Chuva natural | Duplo anel | Cornell |
| NSE | 0,96 | -0,22 | -0,06 |
| RSR | 0,21 | 1,10 | 1,03 |
| AE | | | |
| | Chuva natural | Duplo anel | Cornell |
| NSE | 0,95 | -1,17 | -0,71 |
| RSR | 0,23 | 1,47 | 1,31 |
| VE | | | |
| | Chuva natural | Duplo anel | Cornell |
| NSE | 0,87 | -0,26 | 0,10 |
| RSR | 0,36 | 1,21 | 0,94 |

* SD - solo desnudo, AE - aveia e ervilhaca, VE - vegetação espontânea.

5 CONCLUSÕES

Após um ciclo das culturas de cobertura não foram verificadas alterações nas propriedades físicas do solo como densidade, porosidade, estabilidade de agregados, condutividade hidráulica.

Ocorreu melhoria na continuidade e geometria do sistema poroso quando incluído plantas de cobertura em sistemas de produção após um cultivo, refletindo em aumento da infiltração de água no solo;

A taxa de infiltração de água no solo determinada pelos métodos de duplo anel concêntrico e infiltrômetro de Cornell foi superior a taxa de infiltração estável determinada em escala de parcela com chuva natural, sendo entre 1,8 a 2,6 vezes superiores para as condições avaliadas.

A utilização da taxa de infiltração estável medida por métodos como o duplo anel concêntrico e infiltrômetro de Cornell deve ser usada com cautela quando se busca determinar o escoamento superficial.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 28, p. 519-531. 2004.

ALVES, M.C.; CABEDA, M.S.V. Infiltração de água em um Podzólico vermelho-escuro sob dois métodos de preparo, usando chuva simulada com duas intensidades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 23. p. 753-761. 1999.

ARGENTON, J. et al. Comportamento de atributos relacionados com a forma e estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 29, p. 425-435. 2005.

BARROS, C.A.P. et al. Estimativa da infiltração de água no solo na escala de bacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 38. p. 557-564. 2014.

BEN-HUR, M.; SHAINBERG, I.; MORIN, J. Variability of infiltration in a field with surface-sealed soil. **Soil Science Society American Journal**. v. 51. p. 1299-1302. 1987.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 28. P. 155-163. 2004.

BLANCO-CANQUI, H. et al. Addition of cover crops enhances no-till potential for improving soil physical properties. **Soil and Water Management and Conservation**. v. 75, n.4. p. 1471- 482. 2011.

BLANCO-CANQUI, H. et al. Cover crops and ecosystem services: insights from studies in Temperate soils. **Agronomy Journal**. v. 107, n. 6. p. 2449-2474. 2015.

BOERS, T.M. et al. Comparison of infiltration rates measured with an infiltrometer, a rainulator and a permeameter for erosion research in SE Nogeria. **Soil Technology**. v. 5. p. 13-26. 1992.

CHATTERJEE, A. North-Central US: Introducing cover crops in the rotation. **Crops and Soils**, 2013. v. 46. p.14-15.

CHEN, G.; WEIL, R. R. Penetration of cover crop roots through compacted soils. **Plant and soil**. v. 331, n. 1, p. 31-43. 2010.

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

CHIEZA, E.D. **Sistemas de cultivos de milho consorciados ou não com plantas de cobertura de solo de verão: aspectos produtivos, socioeconômicos e de qualidade do solo**. 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2010.

CHOWDARY, V.M.; RAO, M.D.; JAISWAL, C.S. Study of infiltration process under diferente experimental conditions. **Agricultural Water Management**. v. 83. p. 69-78. 2006.

CONAB. Séries históricas. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=>. Acesso em: 15 out. 2016.

COSTA, E.L. et al. Infiltração de água em solo, determinada por simulador de chuvas e pelo método dos anéis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 3. n. 2. p.131-134. 1999.

CUNHA, E. de Q. et al. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. I - atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 35, n. 2, p. 589-602. 2011.

DORNER, J.; HORN, R. Directon-dependent behaviour of hydraulic and mechanical properties in structured soils under conventional and conservation tillage. **Soil and Tillage Research**. v.102. p.225-232. 2009.

DREWRY, J.J.; CAMERON, K. C.; BUCHAN, G.D. Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing- a review. **Australian Journal of Soil Research.** v.46. p.237- 256. 2008.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solos.** 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. (Documentos, 132).

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa em Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS),** 3º ed. Brasilia. 2013.

FLORENTÍN, M.A.; PEÑALVA, M.; CALEGARI,A.; DERPSCH,R. **Green manure/cover crops and crop rotation in conservation agriculture on small farms.** Rome: FAO, 2011. 97 p.

FOLORUNSO, O.A. et al. Soil surface strength and infiltration rate as affected by winter cover crops. **Soil Technology.** v.5, p. 189-197. 1992.

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

GIACOMINI, S.J. et al. Matéria seca, relação C/N e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em misturas de plantas de cobertura de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v. 27. p. 325-334. 2003.

HARUNA, S. I.; NKONGOLO, N. V. Effects of tillage, rotation and cover crop on the physical properties of a silt-loam soil. **International Agrophysics,** v. 29, n. 2, p. 137-145. 2015.

HILLEL, D. 1998. **Environmental soil physics.** New York, Academic Press, 770 p.

HUBBARD, R. K.; STRICKLAND, T. C.; PHATAK, S. Effects of cover crop systems on soil physical properties and carbon/nitrogen relationships in the coastal plain of Southeastern USA. **Soil and Tillage Research.** v. 126, p. 276-283. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2012.07.009>>

ISERLOH, T. et al. European small portable rainfall simulators: a comparison of rainfall characteristics. **Catena.** v. 112. p. 100-112. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2013.05.013>>.

KAISER, D.R. **Estrutura e água em Argissolo sob distintos preparamos na cultura do milho.** 2010. 150 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2010.

KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. **Size distribution of aggregation.** In: BLACK, C.A., eds. Methods of soil analysis. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.499-510. (Agronomy, 9).

KLUTE, A. **Water retention: laboratory methods.** In: BLACK, C.A., ed. Methods of soil analysis. I. Physical and mineralogical methods. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 635-662.

KORSAKOV, H.R.; ALVAREZ, C.R.; LAVADO, R.S. Cover crops in the agricultural systems of the Argentina Pampas. **Journal of Soil and Water Conservation.** v. 70. 134A-139-A. 2015.

LAL, R. A system approach to conservation agriculture. **Journal of Soil and Water Conservation.** v. 70, n. 4, p. 82A-88A. 2015a. Disponível em: <<http://www.jswconline.org/cgi/doi/10.2489/jswc.70.4.82A>>.

LAL, R. Soil carbon sequestration and aggregation by cover cropping. **Journal of Soil and Water Conservation.** v. 70, n. 6, p. 329-339. 2015b. Disponível em: <<http://www.jswconline.org/content/70/6/329.short>> <<http://www.jswconline.org/cgi/doi/10.2489/jswc.70.6.329>>.

LANZANOVA, E.M. et al. Residual effect of soil tillage on water erosion from a typic Paleudalf under long-term no-tillage and cropping systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v. 34, p.1333-1342. 2010.

LEVIEN, R.; DE JONG VAN LIER, Q.; ALVES, A.G.C. Influence of surface crust on water infiltration rates measured by a rotating-boom rainfall simulator and a double-cylinder device. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v. 24. p. 479-486. 2000.

MIOLA, E.C.C. **Estratégias para reduzir as emissões gasosas e melhorar o aproveitamento do nitrogênio de dejetos de suínos pelo milho em plantio direto.** 2014. 114 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2014.

MITCHELL, J. P. et al. Cover cropping and no-tillage improve soil health in an arid irrigated cropping system in California's San Joaquin Valley, USA. **Soil and Tillage Research.** v. 165, p. 325-335. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.09.001>>.

MORENO, J.A. **Clima do Rio Grande do Sul.** Boletim geográfico do Estado do Rio Grande do Sul. 1961. n. 11. p. 118.

MUBIRU, D. N.; COYNE, M. S. Legume cover crops are more beneficial than natural fallows in minimally tilled Ugandan soils. **Agronomy Journal.** v. 101, n. 3, p. 644-652. 2009.

MUKHERJEE, A.; LAL, R. Short-term effects of cover cropping on the quality of a typic argiaquolls in central Ohio. **Catena.** v. 131, p. 125-129. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.02.025>>.

MYERS, R.; WATTS,C. Progress and perspectives with cover crops: Interpreting three years of farmer surveys on cover crops. **Journal of Soil and Water Conservation**. v. 70. p. 125A-129A. 2015.

NICOLOSO, R.S. et al. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 32, p. 1723-1734. 2008.

OGDEN, C.B.; VAN ES, H.M.; SCHINDELBECK, R.R. Miniature rain simulator for field measurement of soil infiltration. **Soil Science Society American Journal**. v. 61, p. 1041-1043. 1997.

OLIVEIRA, A.E. **Modelagem da infiltração de água no solo com o modelo Green-Ampt**. 2015. 100f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015.

PANACHUKI, E. **Infiltração de água no solo e erosão hídrica, sob chuva simulada, em sistema de integração agricultura pecuária**. 2003. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Dourados, 2003.

PANACHUKI, E. et al. Avaliação da infiltração de água no solo, em sistema de integração agricultura-pecuária, com uso de infiltrômetro de aspersão portátil. **Acta Scientiarum Agronomy**. v. 28. P. 129-137. 2006.

POTT, C.A.; DE MARIA, I.C. Comparação de métodos de campo para a determinação da velocidade de infiltração básica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 27, p. 19-27. 2003.

PRUSKI, F.F. et al. Infiltração de água no solo. Viçosa, MG, **Engenharia na Agricultura**. 26p. 1997. (Caderno didático, 25).

RAO, K.P.C. et al. Rainfall infiltration and runoff from an Alfisol in semi-arid tropical India. I. No-till systems. **Soil and Tillage Research**. v. 48. p. 51-59. 1998.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA,J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**. v. 27, p.29-48. 2003.

REINERT, D.J. et al. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 32, p.1805-1816. 2008.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo- protótipos e teste. **Ciência Rural**. v. 36. p.1931-1935. 2006.

REICOSKY, D. C. Conservation tillage is not conservation agriculture. **Journal of soil and water conservation**. v. 70, n. 5, p. 103A-108A. 2015.

RODRIGUES, S. et al. Permeabilidade ao ar em Latossolo vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 35. p. 105-114. 2011.

SAINJU, U.M.; WHITEHEAD, W.F.; SINGH, B.P. Cover crops and nitrogen fertilization effects on soil aggregation and carbon and nitrogen pools. **Canadian Journal of Soil Science**. v. 83. n. 2. p. 155-165. 2003.

SARTORI, M. G. B. **O clima de Santa Maria: do regional ao urbano**. 1979. 163f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1979.

SEQUINATTO, I. **Qualidade física do solo e rendimento de grãos num Argissolo em processo de recuperação**. 2010,158 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2010.

SIDIRAS, N.; ROTH, C.H. Infiltration measurements with double-ring infiltrometers and a Rainfall simulator under different surface conditions on an Oxisol. **Soil and Tillage Research**. v. 9. p. 161-168. 1987.

SHUKLA, M.J. **Soil Physics: an Introduction**. Taylor e Francis Group, LLC. 2008. 458 p.

STEELE, M.K.; COALE, F.J.; HILL, R.L. Winter annual cover crop impacts on no-till soil physical properties and organic matter. **Soil Science Society American Journal**. v. 76. p. 2164-2173. 2012.

STROM, S. Cover crops, a farming revolution with deep roots in the past. The New York Times. New York, 06 Feb. 2016. Disponível em: https://www.nytimes.com/2016/02/07/business/cover-crops-a-farming-revolution-with-deep-roots-in-the-past.html?_r=2. Acesso em: 01 mar. 2016.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Stabilization of soil aggregates by the root system of ryegrass. **Australian Journal Soil Research**. v.17, p.429-441, 1979.

TORMENA, C.A. et al. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 31. p. 211-219. 2007.

WANG, Y. et al. Infiltration and runoff generation under various cropping patterns in the red soil region of china. **Land Degradation and Development**. v. 27, n. 1, p. 83-91. 2016.

WUTKE, E.B.; CALEGARI, A.; WILDNER, L.P. **Espécies de adubos verdes e plantas de cobertura e recomendações para seu uso**. In: LIMA FILHO et al. Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: Fundamentos e prática. EMBRAPA, Brasília, DF. 2014. 507 p.

YU, Y. et al. Estimation of runoff mitigation by morphologically different cover crop root systems. **Journal of Hydrology**. v. 538, p. 667-676. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.060>>.

ZWIRTES, A.L. et al. Utilização do infiltrômetro de Cornell e dos anéis concêntricos para a determinação da infiltração de água em um Latossolo Vermelho. **Semina: Ciências Agrárias**. v.34, n. 6. p. 3489-3500. 2013.