



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO-UFRPE**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO-PRPPG**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL-PPEAMB**

RANIELE ADAME GOMES

**PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL COMBINANDO INFILTRÔMETROS DE**  
**ANEL SIMPLES E DE ASPERSÃO: INTERPRETAÇÃO HIDRODINÂMICA EM**  
**SOLOS SOB AGROECOSSISTEMAS DO SERTÃO DO PAJEÚ**

Recife-PE  
2022

RANIELE ADAME GOMES

**PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL COMBINANDO INFILTRÔMETROS DE ANEL SIMPLES E DE ASPERSÃO: INTERPRETAÇÃO HIDRODINÂMICA EM SOLOS SOB AGROECOSSISTEMAS DO SERTÃO DO PAJEÚ**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Soares de Souza

Coorientador: Prof. Dr. José Ramon Barros Cantalice

Recife-PE  
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Sistema Integrado de Bibliotecas  
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

G633p

Gomes, Raniele Adame

Procedimento experimental combinando infiltrômetros de anel simples e de aspersão: Interpretação hidrodinâmica em solos sob agroecossistemas do Sertão do Pajeú / Raniele Adame Gomes. - 2022.  
96 f. : il.

Orientador: Eduardo Soares de Souza.

Coorientador: Jose Ramon Barros Cantalice.

Inclui referências e anexo(s).

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Recife, 2022.

1. Condutividade hidráulica. 2. Simulador de chuva. 3. Infiltração. 4. Beerkan. I. Souza, Eduardo Soares de, orient. II. Cantalice, Jose Ramon Barros, coorient. III. Título

CDD 620.8

---

RANIELE ADAME GOMES

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL COMBINANDO INFILTRÔMETROS DE ANEL  
SIMPLES E DE ASPERSÃO: INTERPRETAÇÃO HIDRODINÂMICA EM SOLOS SOB  
AGROECOSSISTEMAS DO SERTÃO DO PAJEÚ

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, na Área de Concentração de Tecnologia e Gestão do Meio Ambiente – Gestão Ambiental e de Recursos Hídricos.

Aprovada em \_\_\_\_ de \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

---

Prof. Dr. Eduardo Soares de Souza  
Presidente da Banca e Orientador

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Marcus Metri Corrêa/DTR/UFRPE  
Membro Interno

---

Prof. Dr. Severino Martins dos Santos Neto/DRC/NT/CAA/UFPE  
Membro Externo

*Aos meus pais, Janete e Cazuza,  
pelo amor e apoio incondicional  
em minha vida.*

Dedico

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida e por me conceder saúde, força e coragem para continuar minha caminhada e superar as dificuldades.

Aos meus pais, Janete e Cazuzza, pelo amor incondicional, incentivo e apoio diário. Sou eternamente grata a vocês.

Aos meus irmãos, Estrehallys (*in memoriam*), Marcos e Zinho, por todo suporte, torcida e fraternidade.

Aos meus sobrinhos, Maria Alice e Júnior, pelos muitos momentos de alegria.

Ao meu noivo, Jesus Carlos, por todo amor, companheirismo e incentivo. Por sempre acreditar em mim e estar ao meu lado em todos os momentos.

Ao professor Dr. Eduardo Soares, por toda a orientação, responsabilidade, dedicação, paciência e ensinamentos.

Aos membros da banca examinadora, pelas valiosas contribuições a esta pesquisa.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), pela infraestrutura oferecida e aos técnicos pelo apoio.

Aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPEAMB/UFRPE), pelos conhecimentos transmitidos durante as disciplinas.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), pela concessão da bolsa de mestrado e financiamento da pesquisa.

Aos colegas, Romário, Thiago e Paulo, pela imprescindível contribuição e disponibilidade para a condução do experimento.

Aos amigos adquiridos durante o mestrado, em especial à Maria e Érika, por toda motivação, amizade e momentos vividos. Vocês estarão sempre no meu coração.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram nessa jornada do mestrado, muito obrigada!

## RESUMO

O conhecimento das propriedades hidrodinâmicas do solo é de fundamental importância para a simulação de processos hidrológicos, contribuindo para a resolução de problemas associados à conservação do meio ambiente, da agricultura e dos recursos hídricos. A retirada da vegetação natural da Caatinga, atrelada aos extensos períodos de seca, resulta em um cenário de degradação dos solos do semiárido. Os sistemas Agroflorestais (SAF's) surgem como alternativas para minimizar a degradação dos solos nessa região. Nesse contexto é importante compreender o funcionamento de diferentes sistemas de manejo do solo durante os períodos de limitação de água para analisar sua capacidade de recuperação. Dessa maneira, propôs-se avaliar a influência de três tipos de coberturas do solo (pasto, Caatinga e agrofloresta) sobre um conjunto de parâmetros hidrodinâmicos inerentes à infiltração da água nos solos, como a condutividade hidráulica ( $K_s$ ) e a sorvidade (S), e outros que auxiliam na descrição das curvas de retenção  $\theta(h)$  e condutividade hidráulica  $K(\theta)$ , essenciais à análise da qualidade física e compreensão da dinâmica da água nesses solos. Experimentos com infiltrômetros de anel simples e aspersão possibilitaram interpretar os valores de  $K_s$  e S. O método semifísico denominado *Beerkan*, a partir de medidas de infiltração e distribuição granulométrica dos solos, possibilitou a caracterização dos parâmetros que descrevem as curvas  $\theta(h)$  e  $K(\theta)$ , conforme os modelos de van Genuchten e Brooks & Corey, respectivamente. Os resultados expressaram em sua maioria que existem diferenças na qualidade físico-hídrica dos solos, com maior destaque para as áreas de Caatinga e sistema agroflorestal. O sistema agroflorestal mostrou-se resiliente, apresentando potencial para recuperação de áreas degradadas em um curto intervalo de tempo.

**Palavras-chave:** Condutividade hidráulica, simulador de chuva, infiltração, *Beerkan*.

## ABSTRACT

The knowledge of the hydrodynamic properties of the soil is of fundamental importance for the simulation of hydrological processes, contributing to the resolution of problems associated with the conservation of the environment, agriculture, and water resources. The removal of the natural vegetation of the Caatinga, linked to the extended periods of drought, results in a scenario of degradation of the semi-arid soils. Agroforestry systems (SAFs) emerge as alternatives to minimize soil degradation in this region. In this context, it is essential to understand the functioning of different soil management systems during periods of water limitation in order to analyze their recovery capacity. In this way, we propose to evaluate the influence of three types of soil cover (pasture, Caatinga, and agroforestry) on a set of hydrodynamic parameters inherent to water infiltration in soils, such as hydraulic conductivity ( $K_s$ ) and sorptivity ( $S$ ), and others that help in the description of retention curves  $\theta(h)$  and hydraulic conductivity  $K(\theta)$ , essential to the analysis of physical quality and understanding of water dynamics in these soils. Experiments with a single ring and sprinkler infiltrometers made it possible to interpret the values of  $K_s$  and  $S$ . The semi-physical method called Beerkan, based on infiltration measurements and soil particle size distribution, makes it possible to characterize the parameters that describe the  $\theta(h)$  and  $K(\theta)$  curves, according to the van Genuchten and Brooks & Corey models, respectively. Most of the results expressed differences in the physical-hydric quality of the soils, with greater emphasis on the areas of Caatinga and the agroforestry system. The agroforestry system proved to be resilient, showing potential for recovering degraded areas in a short time.

**Keywords:** Hydraulic conductivity, rain simulator, infiltration, Beerkan.

## LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 1

Figura 1. Diferenças entre curvas de retenção de água em solos de textura arenosa, franca e argilosa. Fonte: RAMOS et al., 2016. ....	26
---	----

## LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 2

Figura 1. Mapa de localização da área experimental.....	45
Figura 2. Áreas de pasto (a), Caatinga (b) e sistema agroflorestal (c). ....	46
Figura 3. Coleta das amostras de solo indeformadas com trado tipo Uhlund. ....	46
Figura 4. Triângulo de classificação textural de solos.Fonte: Lemos e Santos (1984). ....	47
Figura 5. Infiltrômetro de aspersão com pluviômetros no interior da área útil (a), exposição da bandeja à chuva simulada (b), amostras após a exposição (c) e separação dos grânulos por peneiramento (d).....	48
Figura 6. Ensaio com o simulador de chuva sob a utilização do anel de 0,58 m de diâmetro (a) e detalhe da instalação da parcela em campo (b). Ensaio de simulação de chuva com anéis de 0,09 m de diâmetro (c) e detalhe da parcela experimental (d).....	50
Figura 7. Esquematização das medidas de infiltração realizadas com altura $h_{inf} = 0,03$ m (sem o tubo) e altura $h_{inf} = 0,34$ m (com o tubo).....	52
Figura 8. Ensaio de infiltração de água no solo a anel simples com altura de despejo de 0,03 m (a) e 0,34 m (b). ....	52
Figura 9. Exemplos ilustrativos de simulações de chuvas com duração de 50 minutos obtidas para: A) Solo de Caatinga com calha cilíndrica de 0,09 m de diâmetro; B) Solo de Caatinga com calha cilíndrica de 0,58 m de diâmetro; C) Solo de pasto com calha cilíndrica de 0,58 m de diâmetro. As curvas de infiltração, $q$ ( $\text{mm s}^{-1}$ ), foram obtidas subtraindo as taxa de escoamentos, $r$ ( $\text{mm s}^{-1}$ ), das intensidades de chuvas, $i_c$ ( $\text{mm s}^{-1}$ ). As taxas de infiltração experimental sob regime estacionário, $q_s$ ( $\text{mm s}^{-1}$ ), foram definidas considerando os últimos pontos da curva com $Er < 2\%$ . ....	59
Figura 10. Curvas de infiltração acumulada em áreas de Caatinga (A) e pasto (B) obtidas por aspersão em calhas coletoras de escoamento superficial cilíndricas de 0,09 e 0,58 m de diâmetros. ....	60
Figura 11. Valores do tempo de estabilização ( $t_s$ ), lâmina de infiltração no momento da estabilização ( $I_{ts}$ ) e lâmina de infiltração total ( $I_t$ ) para as medidas de infiltração por aspersão com dois diâmetros ( $D = 0,09$ e $0,58\text{m}$ ), em solos de Caatinga e pasto.....	62

Figura 12. Valores de sorvidade (S) e condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ), determinados com medidas de infiltração por aspersão para dois diâmetros ( $D = 0,09$ e $0,58\text{m}$ ), em solos de pasto e Caatinga.....	64
Figura 13. Curvas de infiltração das áreas de pasto, Caatinga e sistema agroflorestal para as medidas realizadas com aplicação de água sob $h_{inf} = 0,03$ (A) e $h_{inf} = 0,34$ m (B). .....	67
Figura 14. Valores do tempo de estabilização ( $t_s$ ), lâmina de infiltração no momento da estabilização ( $I_{ts}$ ) e lâmina de infiltração total ( $I_t$ ) para as medidas de infiltração realizadas com infiltrômetro de anel simples em solos de Caatinga, pasto e SAF, com aplicação de água sob altura de $h_{inf} = 0,03$ e $h_{inf} = 0,34$ m.....	68
Figura 15. Valores de sorvidade (S) e condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ) determinados com medidas realizadas com infiltrômetro de anel simples em solos de Caatinga, pasto e SAF, com aplicação de água sob altura de $h_{inf} = 0,03$ e $h_{inf} = 0,34$ m. ....	70
Figura 16. Superfície do solo sob Caatinga após experimentos de infiltração a anel simples, conduzidos em alturas de $0,03$ m (a) e $0,34$ m (b) de despejo de água. ....	73

### LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 3

Figura 1. Curvas granulométricas das amostras de solo das áreas de pasto, Caatinga e sistema agroflorestal. ....	834
Figura 2. Curvas de retenção das áreas de pastagem, caatinga e sistema agroflorestal, obtidas pelo método <i>Beerkan</i> com alturas de aplicação de água durante a infiltração $h_{inf} = 0,03$ e $h_{inf} = 0,34$ m. ....	867
Figura 3. Indicadores de qualidade física do solo, densidade do solo- $\rho_s$ (A), condutividade hidráulica- $K_s$ (B), macroporosidade- $P_{mac}$ (C), capacidade de aeração-CA (D) e capacidade de campo relativa- $CC_r$ (E). ....	89

## LISTA DE TABELAS CAPÍTULO 2

Tabela 1. Caracterização das propriedades físicas dos perfis de solos das áreas de pasto, Caatinga e sistema agroflorestal. ....	55
Tabela 2. Estatística descritiva do tempo de início de escoamento, $t_e$ (s), coeficiente de escoamento, C, intensidade de chuva, $i_c$ ( $\text{mm s}^{-1}$ ) e taxa de infiltração da água no solo no regime estacionário, $q_s$ ( $\text{mm s}^{-1}$ ), obtidos a partir de simulações de chuvas realizadas nas áreas de pasto e de Caatinga. ....	56
Tabela 3. Estatística descritiva da condutividade hidráulica saturada, $K_s$ ( $\text{mm h}^{-1}$ ) obtida a partir de medidas de infiltração com o Beerkan e sob duas alturas de aplicação de água ( $h_{inf}$ ), em áreas de pasto, Caatinga e SAF.....	711
Tabela 4. Valores de Sorvidade, S ( $\text{mm s}^{-1/2}$ ) e condutividade hidráulica Saturada, $K_s$ ( $\text{mm s}^{-1}$ ), determinados com o BEST-steady para medidas com infiltrômetros de aspersão e de anel simples (Beerkan), em áreas de pasto, Caatinga e SAF. ....	73

## LISTA DE TABELAS CAPÍTULO 3

Tabela 1. Estatística dos parâmetros da curva de retenção de água no solo, ou seja, teor de água do solo saturado, $\theta_s$ , n, m e parâmetro de escala, $h_g$ , obtido com o BEST, sob diferentes alturas de derramamento de água. ....	85
---	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>BEST</i>	<i>Beerkan estimation of soil transfer parameters</i>
CA	Caatinga
DTP	Distribuição de tamanho de partículas
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
PA	Pastagem
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i>
SAF	Sistema Agroflorestal
USDA	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

## LISTA DE SÍMBOLOS

$K(\theta)$	Curva de condutividade hidráulica
$h(\theta)$	Curva de retenção de água no solo
$K_s$	Condutividade hidráulica saturada
$\phi$	Porosidade total
$q$	Densidade de fluxo
$S$	Sorvidade do solo
$\theta$	Umidade volumétrica
$\theta_0$	Umidade inicial
$\theta_r$	Umidade residual
$\theta_s$	Umidade de saturação
$\rho_p$	Densidade de partículas
$\rho_s$	Densidade do solo

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – REFERENCIAL TEÓRICO .....	15
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 O SOLO .....	16
3 INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO .....	18
4 INFILTRAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO .....	20
5 INFILTRÔMETRO DE ANEL SIMPLES .....	21
6 INFILTRÔMETROS DE ASPERSÃO .....	23
7 PROPRIEDADES HIDRODINÂMICAS DO SOLO .....	25
7.1. Curva de retenção $\theta(h)$ .....	25
7.1. Curva de condutividade hidráulica $K(\theta)$ .....	26
8 METODOLOGIA <i>BEERKAN</i> .....	26
9 USOS E MANEJOS DO SOLO .....	32
10 SISTEMAS AGROECOLÓGICOS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO.....	33
11 REFERÊNCIAS .....	34
CAPÍTULO 2 - SORVIDADE E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA OBTIDAS COM INFILTRÔMETROS DE ASPERSÃO E ANEL SIMPLES EM ÁREAS DE PASTO, CAATINGA E SISTEMA AGROFLORESTAL .....	43
1 INTRODUÇÃO.....	43
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	44
2.1 ÁREA DE ESTUDO.....	44
2.2 AMOSTRAGEM E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO .....	46
2.3 INFILTRÔMETRO DE ASPERSÃO .....	47
2.4 INFILTRÔMETRO DE ANEL SIMPLES .....	51
2.5 ALGORITMO BEST .....	53
2.6 PROCEDIMENTO ESTATÍSTICO .....	54
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	54
3.1 EXPERIMENTOS COM INFILTRÔMETRO DE ASPERSÃO .....	56
3.2 EXPERIMENTOS COM INFILTRÔMETRO DE ANEL SIMPLES .....	66
3.3 INFILTRÔMETRO DE ASPERSÃO <i>versus</i> <i>BEERKAN</i> .....	72
4 REFERÊNCIAS .....	74
CAPÍTULO 3 – AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICO-HÍDRICA DE SOLOS SOB SISTEMAS DE PASTAGEM, CAATINGA E AGROFLORESTA .....	78
1 INTRODUÇÃO.....	78

2 MATERIAL E MÉTODOS.....	79
2.1 ÁREA DE ESTUDO.....	79
2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DO SOLO.....	80
2.3 ENSAIOS COM INFILTRÔMETRO DE ANEL SIMPLES .....	80
2.4 BEST – ALGORITMO E ANÁLISE DE DADOS.....	81
2.5 PROCEDIMENTO ESTATÍSTICO .....	83
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	83
4 REFERÊNCIAS .....	89
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	93
ANEXO A1 .....	94

## CAPÍTULO 1 – REFERENCIAL TEÓRICO

### 1 INTRODUÇÃO

O solo é um componente natural, não renovável e bastante susceptível a alterações. A degradação desse recurso se dá, principalmente, devido a sua utilização de maneira incorreta e ao seu planejamento inadequado, consistindo, atualmente, em um problema de escala global, provocando inúmeros danos ambientais, sociais e econômicos, estes oriundos, reiteradamente, de indevidas práticas agrícolas (RAMOS; GONÇALVES; PEREIRA, 2016).

Os efeitos cada vez mais severos das mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global têm acentuado a escassez hídrica em regiões áridas e semiáridas, tornando esta problemática uma questão cada vez mais importante (ZHANG E SHANGGUAN, 2016). O semiárido do Nordeste do Brasil apresenta características físicas relativamente desfavoráveis às atividades agropecuárias. As condições pedoclimáticas da região, com predomínio de solos rasos (pedregosos e arenosos), formados sob elevadas temperaturas e evapotranspiração, chuvas escassas e mal distribuídas, contribuem para um limitado armazenamento de água no solo, o que prejudica consequentemente o desenvolvimento das plantas (ABAKER et al., 2018).

Além dos aspectos climáticos, a região semiárida é afetada pelo uso insustentável dos seus recursos naturais e pelas mudanças no uso da terra. A retirada da vegetação natural da Caatinga, principal bioma do semiárido, resulta em um cenário de degradação dos solos. Isso ocorre devido à exposição das suas camadas superficiais a grandes variações térmicas, ocasionando a perda de qualidade ambiental e agrícola destes solos. Entre as principais causas da redução da qualidade de solos da Caatinga, está a conversão do uso do solo de mata nativa para pastagens, principalmente pela pressão aplicada do tráfego de animais e máquinas agrícolas, promovendo alterações nos seus atributos (SOUSA et al., 2012; DE SOUZA MEDEIROS et al., 2020).

Em vista disso, é evidenciado o problema de compactação do solo, que dificulta o desenvolvimento das raízes, reduz a absorção de nutrientes e a exploração de água no solo pelas plantas (DE MORAES, 2017). Esses fatores estão associados à diminuição de índices como a porosidade e a condutividade hidráulica, promovendo o comprometimento da capacidade de infiltração desses solos (DE MORAES et al., 2016; FRANCHINI et al., 2017).

Os Sistemas Agroflorestais (SAF's) surgem como alternativas para a minimização a degradação ambiental dos solos nesta região. Esses sistemas são formas de uso e manejo dos

recursos naturais, nas quais espécies lenhosas são utilizadas em associação com culturas agrícolas e/ou em integração com animais, de forma simultânea ou sequencial. Não consistindo em uma ferramenta recente, essa técnica já era utilizada há séculos pelos indígenas. No entanto, apenas nas últimas décadas sua prática tem ganhado escala e reconhecimento, visto o seu elevado potencial para promoção do desenvolvimento rural sustentável (RIGHI, 2015).

A utilização de SAF's proporciona um equilíbrio ambiental e a otimização do uso da terra devido à combinação de espécies vegetais a animais, além de propiciar melhores condições de utilização do solo, da água e do ambiente, restabelecendo a qualidade dos recursos naturais (SCHEMBERGUE et al., 2017). De acordo com Marchini et al. (2015), isso se dá, principalmente devido à manutenção da matéria orgânica no solo, o que promove melhorias nos seus atributos físicos, bem como nos químicos e biológicos, favorecendo assim o desenvolvimento das plantas.

O estudo acerca das características hidrodinâmicas e eventuais limitações do solo tem caráter essencial e determinante para a compreensão de processos ambientais. A determinação dessas propriedades do solo requer medições em campo e laboratório que exige uma demanda considerável de tempo e elevado custo operacional. À vista disso, pesquisadores desenvolveram metodologias mais simples e menos onerosas, que requerem dados prontamente disponíveis e mais usuais (EWING e HORTON, 2007). De acordo com Lassabatère et al. (2006), diversos métodos têm sido desenvolvidos para estimar as propriedades hidrodinâmicas do solo. Os mais práticos necessitam de informações relacionadas à granulometria do solo e de ensaios de campo simples (DI PRIMA et al., 2016; SOUZA et al., 2008; BAGARELLO e LOVINO, 2012).

Diante do exposto, essa revisão teve como propósito abordar o uso, manejo e conservação do solo na região semiárida, bem como sobre as propriedades hidrodinâmicas dos solos e sua determinação a partir de método semifísico denominado *Beerkan* (HAVERKAMP et al., 1998; BRAUD et al., 2005; LASSABATÈRE et al., 2006).

## **2 O SOLO**

O solo é o principal meio de desenvolvimento vegetal e animal, dispondo de diversas funcionalidades básicas à vida na Terra. Considerado um recurso natural de grande relevância, ele é resultante da relação entre fatores ambientais, como relevo, clima, material de origem e seres vivos através do tempo, sendo capaz de armazenar e transformar resíduos,

reter água e promover nutrientes às plantas, que são utilizadas como alimentos pelos animais e seres humanos (DE OLIVEIRA et al., 2020).

Definido como um sistema dinâmico, o solo é integrado pelas fases sólida, líquida e gasosa. As fases líquida e gasosa preenchem o espaço poroso do solo. Este, quando totalmente ocupado por água e por ar, diz-se que o solo está saturado, e não saturado quando os vazios estão parcialmente preenchidos por água e ar. A fase sólida, denominada matriz do solo, é composta por frações minerais, oriundas da desagregação das rochas e por material orgânico provenientes de resíduos de plantas e animais. Estes materiais orgânicos estão presentes no solo em estágios de decomposição variados e os inorgânicos com diferentes dimensões e características, referentes à proporção de argila, silte e areia do solo (BATISTA et al., 2018).

A Tabela 1 a seguir apresenta a distribuição granulométrica do solo, desenvolvida pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA).

**Tabela 1.** Diâmetro médio das frações granulométricas segundo a classificação do USDA.

Frações	Diâmetros (mm)
Areia muito grossa	2 – 1
Areia grossa	1 – 0,5
Areia média	0,5 – 0,25
Areia fina	0,25 – 0,10
Areia muito fina	0,10 – 0,05
Silte	0,05 – 0,002
Argila	< 0,002

Em estudos de movimento da água no solo, é essencial o conhecimento das suas propriedades físicas e hídricas, bem como as suas inter-relações com processos que ocorrem no meio poroso. Para avaliar esse mecanismo, Henry Darcy, em 1856, após desenvolver diversos experimentos sobre o movimento de água em colunas de areia, estabeleceu uma equação, denominada Lei de Darcy (Equação 1).

$$q = -K_s \frac{\partial H}{\partial z} \quad (1)$$

sendo,  $q$  ( $L T^{-1}$ ) a densidade de fluxo;  $K_s$  ( $L T^{-1}$ ) a condutividade hidráulica saturada;  $H$  (L) o potencial total de água no solo e  $z$  (L) a coordenada de posição.

Tal equação estabelece uma proporcionalidade entre a densidade de fluxo e o gradiente de potencial total de água no meio poroso, de acordo com uma constante de permeabilidade, hoje conhecida por condutividade hidráulica do solo saturado  $K_s$ .

A condutividade hidráulica do solo ( $K$ ) é um dos atributos de maior relevância para estudos qualitativos e quantitativos de movimento de água no perfil do solo, pois expressa a facilidade com que a água é transmitida através dos poros nesse meio, retratando o desempenho da sua matriz porosa, integrando fatores como tamanho, estrutura, quantidade e orientação dos poros (ALMEIDA et al., 2017).

De acordo com Amaral et al. (2016), essa propriedade pode variar de acordo com diversos parâmetros físicos associados ao sistema poroso do solo, como a estabilidade de agregados, conteúdo de matéria orgânica, textura, estrutura, entre outros, e também a fatores como o relevo, manejo do solo, cobertura vegetal, conteúdo de água no solo e tipo do fluido percolante. Tais elementos, quando associados, provocam elevadas alterações nos valores da condutividade hidráulica, mesmo em áreas muito próximas geograficamente, o que compromete ainda mais seu estudo.

Esse parâmetro do solo assume grande importância na avaliação de problemas ligados à agricultura e ao meio ambiente (ALMEIDA et al., 2017), sendo capaz de auxiliar no conhecimento acerca dos processos de infiltração de água, otimizando a determinação do balanço hídrico em bacias hidrográficas. Além de favorecer o entendimento a respeito da área de recarga dos aquíferos, possibilita também o desenvolvimento de técnicas para o gerenciamento integrado e sustentável da água (ROCHA et al., 2019).

A estimativa da condutividade hidráulica pode ser realizada tanto em solo saturado, onde há o total preenchimento dos poros com água, quanto em solo não saturado, no qual apresenta menor volume de água. Quando saturado, o solo alcança um valor máximo de condutividade, pois nessa condição todos os poros se encontram conduzindo água. Quando não saturado, o ar presente em alguns poros faz com que a velocidade de fluxo seja reduzida, diminuindo rapidamente a condutividade hidráulica (ALMEIDA et al., 2017).

A determinação desse parâmetro pode ser feita a partir de ensaios conduzidos em campo ou laboratório. Os experimentos realizados em campo são comumente mais utilizados, devido à sua maior representatividade para a área em estudo e menor dispêndio operacional (FERRAZ et al., 2015; PENNER et al., 2019).

Um fator limitante para os ensaios realizados em laboratório está associado à necessidade do uso de amostras indeformadas do solo, as quais após a coleta devem ser

aplicadas a testes laboratoriais, que demandam muito tempo e recurso. Esses ensaios, além de dispendiosos, também requerem ferramentas específicas e profissional capacitado. Desta maneira, uma das alternativas para a determinação da condutividade hidráulica é o uso de modelos matemáticos (JUNQUEIRA et al., 2018).

### **3 INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO**

O conceito de qualidade do solo está associado ao potencial do solo em assegurar a produtividade biológica, preservando a qualidade ambiental e fornecendo a saúde das plantas, animais e do homem (DORAN e PARKIN, 1994). De modo geral, essa qualidade é analisada em função dos aspectos físicos, químicos e biológicos. No entanto, quando atrelada ao uso e manejo do solo, os atributos físicos são os mais empregáveis, devido a uma maior suscetibilidade destes a alterações (STEFANOSKI et al., 2013).

O estudo da qualidade física de um solo é realizado por meio de indicadores responsáveis pela avaliação da sua estrutura, os quais refletem as condições da estabilidade de agregados e propicia informações para a compreensão de processos hidrológicos (STEFANOSKI et al., 2013; LISBOA et al., 2016). Entre os principais indicadores físicos da qualidade do solo estão: densidade do solo ( $\rho_s$ ), condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ), macroporosidade ( $P_{mac}$ ), capacidade de aeração (CA) e a capacidade de campo relativa ( $CC_r$ ), estes relacionados ao arranjo das partículas e ao espaço poroso do solo (REYNOLDS et al., 2009).

Solos com baixa qualidade física estão propensos ao escoamento superficial, podem apresentar reduzida capacidade de infiltração de água, baixa aeração, crescimento deficiente do sistema radicular, dentre outras alterações (ANDRADE e STONE, 2009). Atrelado a esses fatores, a utilização de indicadores da qualidade de solo torna-se imprescindível para a caracterização ambiental e produtiva do solo.

A densidade do solo é a relação existente entre a massa de uma amostra de solo e o seu volume total. Ela pode ser influenciada por fatores que alteram a estrutura do solo, e neste sentido, através desse atributo é possível verificar o grau de compactação do solo, sendo também utilizada para calcular o estoque de carbono, nutrientes e água disponível para as plantas (AL-SHAMMARY et al., 2018). De acordo com Brady e Weil (2013), os valores de densidade de solo podem variar de acordo com a composição mineralógica e orgânica do

mesmo, sendo de 1,3 a 1,8 kg dm<sup>-3</sup> para solos arenosos; 0,9 a 1,6 kg dm<sup>-3</sup> para solos argilosos e 0,2 a 0,6 kg dm<sup>-3</sup> para solos orgânicos.

Por ser uma propriedade inerente às atividades que alteram o arranjo das partículas e volume dos poros, a  $\rho_s$  pode refletir em outros atributos físico-hídricos, como a infiltração e retenção de água (NETO; OLIVEIRA; PEREIRA, 2017; TORMENA; ROLOFF; SÁ, 1998).

Segundo Carducci et al. (2013) a distribuição volumétrica dos poros nos solos pode interferir no seu funcionamento físico-hídrico. Poros com diâmetros maiores que 0,05 mm são classificados como macroporos, responsáveis pela aeração do solo, interferindo na capacidade de infiltração e do crescimento radicular. Por outro lado, os poros menores que 0,05 mm, denominados microporos, estão associados à retenção e ao armazenamento de água e solutos no solo para as raízes (CARDUCCI et al., 2013; KIEHL, 1979).

A compactação do solo, quando associada ao manejo inadequado, causa a diminuição na quantidade de macroporos e o aumento na sua densidade, tendo com consequência a redução na infiltração de água e na aeração do solo, além do aumento da resistência física à expansão radicular e na retenção de água no meio, conferindo ao solo maiores chances de erosão hídrica (FOLONI et al., 2006; LETEY, 1985).

A macroporosidade do solo ou porosidade drenável é um atributo que representa o volume de poros no qual a água livre se movimenta e é drenada quando a capacidade de campo é alcançada (PIZARRO, 1978). Ela é responsável pela capacidade de aeração do solo, e, portanto, está associada ao fornecimento de oxigênio para as raízes das plantas. (THOMASSON, 1978; GRABLE e SIEMER, 1968). Em contrapartida, a capacidade de campo ocorre quando a matriz do solo retém a quantidade máxima de água, após ocorrida a saturação e drenagem gravitacional nesse meio (MEYER e GEE, 1999).

A capacidade de campo relativa ( $CC_r$ ) corresponde ao balanço ótimo entre as capacidades máximas de retenção de água e de aeração na zona rizosférica do solo, sendo assim, um parâmetro de grande importância para o estudo da qualidade física do solo. Segundo Olness et al. (1998), para ser considerada ideal, a  $CC_r$  deve variar entre 0,6 e 0,7, de maneira que tenha um balanço ótimo entre a capacidade de água e a capacidade de aeração do solo na zona radicular. Valores superiores ou inferiores aos dessa faixa provocam a diminuição da atividade microbiana no solo, em decorrência do conteúdo insuficiente de água e ar nesse meio (REYNOLDS et al., 2008).

#### **4 INFILTRAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO**

O processo de infiltração pode ser definido, conforme Brandão et al. (2006), como a dinâmica de penetração da água pelas camadas superficiais do solo. Seu conhecimento é de extrema relevância para o estabelecimento de medidas de conservação do solo, uma vez que é considerado um bom indicador na avaliação da qualidade física desse recurso, fornecendo informações relevantes sobre as características do solo, como estrutura, porosidade e compactação (WANG et al., 2014; ANDRADE et al., 2020).

De acordo com Santos e Pereira (2013), diversos fatores podem interferir no processo de infiltração de água no solo, entre eles, as características da chuva, como a intensidade de precipitação, volume da chuva e distribuição do tamanho das gotas e as propriedades físicas do solo, como densidade, porosidade, textura, umidade antecedente, declividade, dentre outros. Além desses, fatores antrópicos como uso e ocupação do solo influenciam diretamente no potencial de infiltração (MINOSSO, ANTONELI e DE FREITAS, 2017).

A velocidade desse processo pode ser alterada conforme as condições físicas e morfológicas do solo, ocorrendo mais rapidamente se o solo estiver seco e composto por uma maior quantidade de macroporos vazios, e sendo reduzida à medida que este é umedecido, ou seja, à proporção que a água ocupa o espaço poroso (VILARINHO et al., 2019).

Em solos com maiores frações de argila em sua composição mineralógica ou mal estruturados, como os solos compactados, a velocidade de infiltração faz-se de maneira mais lenta (SOUZA e RODRIGUES, 2014). Essa redução na velocidade de infiltração em áreas compactadas se dá, geralmente, devido à pressão exercida pelo tráfego de máquinas e animais sob o solo. Como exemplo tem-se os solos sob as áreas de pastagens, os quais são submetidos a uma alta compactação provocada pela ação direta de cascos animais (NERY et al., 2020).

Existem diversos modelos que descrevem o processo de infiltração de água no solo, entre os mais conhecidos estão os modelos de Green e Ampt (1911), Horton (1939), Philip (1957), Kostiakov (1932), Kostiakov-Lewis (1938). Esses modelos são normalmente utilizados para descrever o processo de infiltração unidirecional ( $I_{1D}$ ) obtidos a partir de infiltrômetros de anéis concêntricos (ZHANG et al., 2017) ou de aspersor tipo simulador de chuvas (ALVES SOBRINHO et al., 2008). A metodologia denominada *Beerkan* considera as medidas com o infiltrômetro de anel simples para avaliar o processo de infiltração tridimensional axissimétrica ( $I_{3D}$ ) a partir de um conjunto equações com dois termos referentes a sorvidade e a condutividade hidráulica, definidos por um conjunto de algoritmos alternativos BEST- *Estimation of Soil Transfer Parameter* (SOUZA et al., 2008). Resta saber

como o procedimento BEST responde às medidas de infiltração IID a partir de infiltrômetros por aspersão sob chuvas intensas.

## **5 INFILTRÔMETRO DE ANEL SIMPLES**

Diversos métodos fundamentados na infiltração da água no solo foram criados para a determinação das propriedades hidrodinâmicas do solo aplicando pequena quantidade de água e vem sendo bastante empregados por pesquisadores devido à sua praticidade. Dentre os diferentes tipos de infiltrômetros desenvolvidos, o método anel simples, o qual possibilita a determinação da infiltração no campo em função do tempo, tem se tornado satisfatório e bastante usual, em razão da sua simplicidade, sendo bastante utilizado em pesquisas (BARRETO et al., 2001; BAGARELLO et al., 2004; SOARES, 2010).

O infiltrômetro de anel simples consiste em um cilindro metálico de diâmetro conhecido e permite ensaios de infiltração tridimensional axissimétrica (SOUZA et al., 2008; NETTO et al., 2013). Para a realização das medidas de infiltração, o cilindro é posicionado na superfície do solo e inserido a uma profundidade de aproximadamente 1 cm, de modo a evitar a desestruturação e perdas laterais de água no decorrer do processo de infiltração. No seu interior são vertidos, consecutivamente, de dez a vinte volumes idênticos de água, e cronometrado o tempo necessário para a infiltração de cada volume. O ensaio é encerrado quando o tempo entre as adições de água torna-se constante (LASSABATÈRE et al., 2006).

Antes do experimento de infiltração, é feita a coleta de amostras deformadas do solo para a análise da granulometria, bem como para a análise da umidade inicial, e a coleta no final do processo de infiltração para a análise da umidade final. Além disso, também é procedida a coleta de amostras indeformadas sob o uso de um cilindro de volume conhecido, de modo a determinar a massa específica do solo, conforme as orientações do Manual de Métodos de Análise de Solo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1997).

Em comparação a outros métodos experimentais, no método a anel simples não é preciso uma preparação prévia da superfície do solo e outras exigências, necessitando apenas de cuidado durante a aplicação de água no interior do anel, de forma a não gerar perturbação na superfície confinada do solo (SOUZA et al., 2008; NETTO et al., 2013).

Souza et al. (2008) também utilizaram esse infiltrômetro para a determinação das propriedades hidrodinâmicas em solos de diferentes classes texturais, e puderam verificar a efetividade do método, o qual mostrou-se completamente adequado para a modelagem

tridimensional da infiltração em campo, além de possibilitar a caracterização hidrodinâmica de diferentes tipos de solos e em diversos pontos, permitindo um estudo mais prático e representativo. Silva Júnior et al. (2016) evidenciam a simplicidade e eficiência do ensaio de infiltrômetro a anel simples para determinar a infiltração de água no solo, com o intuito de obter os principais parâmetros que interferem diretamente no escoamento superficial de uma localidade.

A busca por informações a respeito de fatores intervenientes nos processos de infiltração e nas propriedades hidrodinâmicas do solo tem aumentado no decorrer das últimas décadas. Diante disso, diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos para o entendimento do comportamento dessas variáveis sob diferentes situações. Alguns destes, referentes a comparações dos procedimentos realizados com o infiltrômetro de anel simples com metodologias já existentes para a determinação desses atributos.

Em um estudo recente de Alagna et al. (2016), os autores buscaram avaliar a interferência da altura em que a água é vertida na superfície do solo, de forma a verificar sua influência sobre a condutividade hidráulica do solo determinada através do infiltrômetro a anel simples. Os pesquisadores puderam constatar variações nos valores médios da condutividade conforme a mudança na altura de vertimento da água.

Castellini et al. (2021) analisaram três indicadores de qualidade física do solo, sendo eles a macroporosidade, capacidade de aeração e capacidade de campo relativa, de modo a verificar o impacto de três diferentes alturas de despejo da água sob dois usos distintos do solo, utilizando o anel simples como método. Como resultados, obtiveram alterações significativas nos parâmetros, em ambas as técnicas de manejo, com a variação das alturas de aplicação de água no solo, maiormente quando as alturas eram aumentadas.

Di Prima et al. (2017) realizaram um estudo sobre a ligação entre experimentos de simulação de chuva e de infiltrômetro de anel simples. Para isso, determinaram valores de  $K_s$  sob duas alturas de aplicação de água no infiltrômetro, uma como no procedimento usual, mais próxima da superfície, e outra mais distante, de modo a estabelecer uma semelhança entre as metodologias. Os valores obtidos demonstraram que a maior altura de aplicação de água proporcionou maior consistência entre as execuções com o anel simples e o simulador de chuva.

## **6 INFILTRÔMETROS DE ASPERSÃO**

Os simuladores de chuva ou infiltrômetros de aspersão são equipamentos de estudos planejados para produzir precipitações de maneira semelhante às chuvas naturais (SILVA et al., 2019). Estas ferramentas permitem regular as características das precipitações simuladas e podem ser aplicadas a qualquer período, não havendo limitações do seu uso devido a época do ano (MONTEBELLER et al., 2001).

O uso da simulação de chuvas tem sido bastante adotado para investigações sobre o impacto das gotas de chuva sobre a superfície exposta, visto que, tal estudo é limitado empregando apenas a precipitação natural devido à inconstância desta, não havendo um controle de suas variáveis, como duração, intensidade e frequência (SPOHR et al., 2015). Além do monitoramento destas características, os simuladores permitem a avaliação simultânea da infiltração de água no solo, do escoamento superficial e da perda de solo (SILVA et al., 2019).

Em estudos realizados através de infiltrômetros aspersores, a dinâmica dos processos de infiltração é condicionada, essencialmente, por ação capilar e gravitacional, e, além disso, na maior parte das aplicações, desenvolvida como um sistema de fluxo vertical unidimensional (MONTROYA-DOMINGUEZ et al., 2017).

Os simuladores de chuva visam uma melhor interpretação acerca dos processos hidrológicos e os efeitos destes sobre diferentes condições de uso do solo (NIELSEN et al., 2019), podendo ser utilizados como ferramentas de conscientização acerca da importância da proteção do solo para a sustentabilidade ambiental.

Diversos estudos nas áreas da engenharia e conservação do solo e da água dão destaque à utilização dos infiltrômetros de aspersão como alternativa viável para medições de campo e aplicações a modelos matemáticos que representam a infiltração da água sob solos com diferentes tipos de usos ou sistemas de manejo, visto que, o uso da chuva natural para a determinação da taxa de infiltração constante é dispendioso e vagaroso (PANACHUKI, 2003).

De acordo com Spohr et al. (2015), para que os simuladores de chuvas sejam apropriados, devem gerar gotas com dimensões semelhantes às da chuva natural, proporcionar homogeneidade da precipitação sobre a área analisada, exercer velocidade de impacto das gotas sobre a superfície aproximada à velocidade final das gotas de chuva e formar precipitações com energia similar à da chuva natural. Dessa forma, faz-se necessário a calibração desses equipamentos mediante as características das gotas da chuva simulada,

como o diâmetro médio das mesmas, a distribuição das gotas sobre a superfície do solo e a intensidade de precipitação da chuva (MEYER e HARMON, 1979).

## **7 PROPRIEDADES HIDRODINÂMICAS DO SOLO**

A determinação das propriedades hidrodinâmicas do solo, tais como a curva de retenção  $\theta(h)$  e de condutividade hidráulica  $K(\theta)$ , é indispensável em estudos de movimento e armazenamento de água no solo, já que estas permitem estimar a disponibilidade de água no meio poroso.

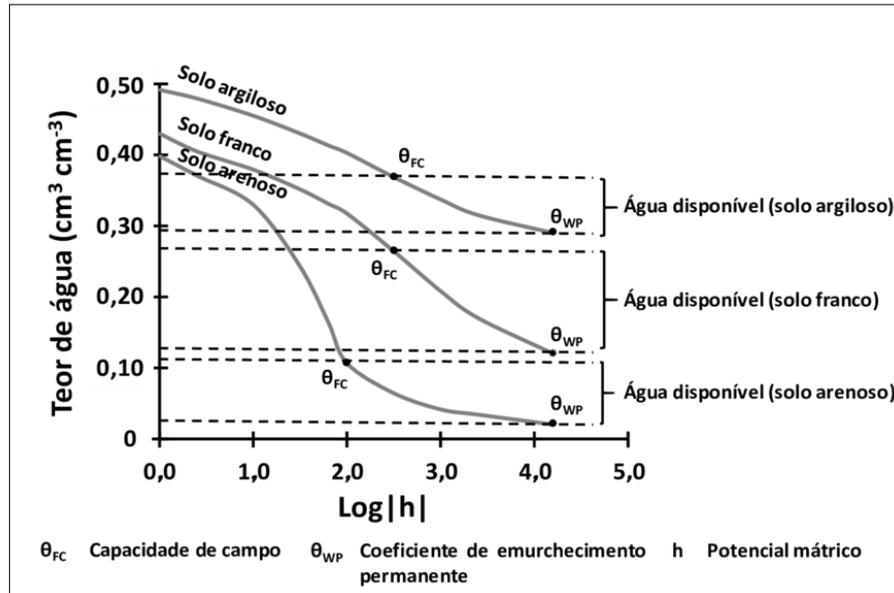
### **7.1. Curva de retenção $\theta(h)$**

A curva de retenção da água no solo representa a relação entre o potencial matricial e teor de água no solo. É conduzida pelas forças mátricas de capilaridade e adsorção (VIEIRA e CASTRO, 1987), e expressa a energia de ligação da água ao solo, sendo influenciada pelas suas propriedades físicas e químicas, substancialmente pela granulometria, estrutura e agregação (FILGUEIRAS et al., 2016; ANDRADE JÚNIOR et al., 2007). Esta curva é um importante indicador físico do solo e uma ferramenta muito útil para a avaliação de qualidade do solo, como infiltração, umidade na capacidade de campo, ponto de murcha permanente e quantidade de água disponível, podendo auxiliar em técnicas de manejo mais eficientes (BARRETO et al., 2011).

A determinação da curva de retenção pode ser efetuada de maneira usual, em ensaios laboratoriais com o uso de amostras do solo deformadas e indeformadas, por diversos métodos, dos quais destacam a centrífuga (COSTA et al., 2008) e a câmara de pressão de Richards (RICHARDS, 1965). A metodologia da câmara de pressão é fundamentada na inserção de amostras de solo previamente saturadas em contato hidráulico com uma placa porosa e submetidas a diferentes potenciais de tensão, até a drenagem total da água retida nos poros, obtendo assim a umidade da amostra por gravimetria.

Diversas propriedades físicas e químicas do solo podem interferir na retenção da água pelo solo, propriedades estas que vão desde a distribuição, arranjo e forma das partículas até a concentração de material orgânico e temperatura, modificando o comportamento da curva de retenção. Dentre os fatores, a textura e estrutura do solo possuem uma maior influência sobre esse atributo. Solos com maiores teores de argila tendem a reter mais água, quando comparados aos solos com maiores teores de areia. Isso se dá devido a uma distribuição mais

uniforme de tamanhos de poros em solos argilosos e maior superfície específica, enquanto que, nos arenosos normalmente os poros são maiores e a superfície específica menor, sendo estes responsáveis por curvas mais acentuadas de retenção de água. A Figura 1 apresenta curvas típicas de retenção para diferentes classes texturais de solo.



**Figura 1.** Diferenças entre curvas de retenção de água em solos de textura arenosa, franca e argilosa. Fonte: RAMOS et al., 2016.

## 7.2. Curva de condutividade hidráulica $K(\theta)$

Denomina-se curva de condutividade hidráulica,  $K(\theta)$ , a relação entre a condutividade hidráulica e a umidade volumétrica do solo (HILLEL, 1998). Em estudos de movimento de água no solo, sua determinação é de fundamental importância, visto que  $K(\theta)$  condiciona a condução de água pelo solo.

A representação e parametrização de  $K(\theta)$  podem ser efetuadas a partir de modelos numéricos ou analíticos. Alguns pesquisadores desenvolveram uma série de relações funcionais para a curva de condutividade hidráulica, as quais analisam a variação da condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica e de modo consequente, o potencial de água no solo (BURDINE, 1953; GARDNER, 1958; BROOKS e COREY 1964; MUALEM, 1976; VAN GENUCHTEN 1980). A partir dos modelos propostos por Burdine (1953) é possível extrair diversas funções hidráulicas fundamentais do solo, a exemplo, tem-se os modelos de Brooks e Corey (1964) e de van Genuchten (1980).

## 8 METODOLOGIA BEERKAN

O *Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters* – denominado também como BEST (LASSABATÈRE et al., 2006) consiste em um método semifísico, baseado na determinação dos parâmetros das curvas de retenção  $\theta(h)$  e de condutividade hidráulica  $K(\theta)$ , partindo das medidas de infiltração e da curva granulométrica, considerando fatores como a textura e a estrutura do solo.

A partir desse método é possível determinar, de acordo com a caracterização hidrodinâmica, dois parâmetros de forma,  $m$  ou  $n$  e  $\eta$ , dependentes essencialmente da textura do solo, e três parâmetros de normalização,  $\theta_s$ ,  $K_s$  e  $h_g$ , dependentes principalmente da estrutura do solo. A obtenção dos parâmetros de forma é realizada partindo de informações da distribuição do tamanho das partículas (DTP) e da porosidade do solo, já os parâmetros de normalização, por meio dos ensaios de infiltração obtidos a partir do infiltrômetro de anel simples (SANTOS et al., 2012).

A metodologia *Beerkan* tem sido bastante utilizada para diversos estudos do processo de caracterização hidráulica por se tratar de um método simples, acessível e eficaz, sendo aplicada na caracterização de solos agrícolas, solos florestais e solos de áreas urbanas (SOUZA et al., 2008; BAGARELLO; LOVINO, 2012; LASSABATÈRE et al., 2019).

Segundo Oliveira e Soares (2017), o BEST é um dos modelos mais recentes e eficientes de infiltração, visto que se faz o uso do anel simples para a experimentação e os dados resultantes da distribuição granulométrica do solo em estudo para a determinação dos parâmetros hidráulicos essenciais para sua elaboração.

Uma das principais vantagens da utilização da metodologia *Beerkan* é que no geral as aplicações são simples de se operar, completas, de curta duração e de baixo custo. Ademais, para os ensaios de infiltração realizados em campo são utilizados volumes relativamente altos de solos estruturados, mantendo as características do solo e favorecendo assim a exatidão na estimativa dos parâmetros, quando comparado com aplicações em laboratório empregando pequenas amostras (FERNÁNDEZ-GÁLVEZ et al., 2019).

Para esta metodologia, faz-se o uso de modelos para a descrição dos parâmetros das curvas de retenção  $\theta(h)$  e de condutividade hidráulica  $K(\theta)$ . Como exemplos têm-se os propostos por van Genuchten (1980) para  $\theta(h)$ :

$$\theta(h) = (\theta - \theta_r) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{h}{h_g} \right)^n \right]^{-m} + \theta_r \quad \text{com} \quad m = 1 - \frac{2}{n} \quad (\text{BURDINE, 1953}) \quad (2)$$

e Brooks & Corey (1964) para  $K(\theta)$ :

$$K(\theta) = K_s \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\eta \quad \text{com} \quad \eta = \frac{2}{mn} + 2 + p \quad (\text{BURDINE, 1953}) \quad (3)$$

Onde:

$\theta$  [ $L^3 L^{-3}$ ] é a umidade volumétrica;

$\theta_r$  [ $L^3 L^{-3}$ ] e  $\theta_s$  [ $L^3 L^{-3}$ ] as umidades volumétricas residual e saturada, respectivamente, sendo

$\theta_r$  assumida como 0 no BEST;

$h$  [L] o potencial matricial;

$h_g$  [L] um valor de escala de  $h$ ;

$m$  e  $n$  são parâmetros de forma;

$K_s$  [ $L T^{-1}$ ] a condutividade hidráulica saturada do solo;

$\eta$  o parâmetro de forma para a curva de condutividade hidráulica; e,

$p$  é um fator de tortuosidade definido igual a 1 quando a relação entre  $n$  e  $m$  é descrita pelo modelo de Burdine (1953).

Os parâmetros de forma das curvas  $\theta(h)$  e  $K(\theta)$  são obtidos a partir de ajustes da DTP às equações desenvolvidas por Haverkamp e Parlange (1986):

$$F(D) = \left[ 1 + \left( \frac{D_g}{D} \right)^N \right]^{-M} \quad \text{com} \quad M = 1 - \frac{2}{N} \quad (4)$$

sendo  $F(D)$  a frequência acumulada que está relacionada ao diâmetro das partículas  $D$  [L],  $D_g$  o parâmetro de escala e  $m$  e  $n$  os parâmetros de forma da curva de distribuição do tamanho de partículas.

Os parâmetros de forma  $m$  e  $n$  são estimados através do índice de forma do meio,  $p_m$ , expressos por:

$$m = \frac{1}{p_m} (\sqrt{1 + p_m^2} - 1) \quad (5)$$

$$n = \frac{2}{1-m} \quad (6)$$

No qual  $p_m$  é obtido a partir de M e N por (ZATARÁIN et al., 2003):

$$p_m = \frac{MN}{1+M} (1 + \kappa)^{-1} \quad (7)$$

com o coeficiente  $\kappa$  definido por Fuentes et al. (1998) como:

$$\kappa = \frac{2s-1}{2s(1-s)} \quad (8)$$

sendo  $s$  a dimensão fractal do solo.

Três algoritmos alternativos foram desenvolvidos para analisar as medidas de infiltração de campo, sendo estes, BEST-slope, BEST-intercept e BEST-steady. Todos fazem uso dos mesmos dados de entrada, ou seja, distribuição do tamanho de partículas, densidade do solo, umidade inicial e curva de infiltração acumulada, no entanto, diferem no processo de ajuste dos dados experimentais aos modelos de infiltração para os estados transientes e estacionários (DI PRIMA et al., 2018).

O algoritmo BEST-slope de Lassabatère et al. (2006) utiliza a primeira parte da curva de infiltração acumulada para se ajustar ao modelo transitório da curva de infiltração acumulada proposto anteriormente por Haverkamp et al. (1994) e acrescenta como informação o valor final da inclinação para a descrição do estado estacionário.. O BEST-intercept também faz uso da primeira parte da infiltração acumulada para o ajuste ao mesmo modelo transitório, mas utiliza a interceptação da linha descrita pelos últimos pontos para descrever o estado estacionário (YILMAZ et al., 2010). Já o modelo BEST-steady não

emprega a parte inicial das curvas, porém, para a descrição do estado estacionário, faz uso tanto da inclinação, quanto da interceptação da reta demarcada pelos últimos pontos (BAGARELLO et al., 2014). Todos os modelos estimam a condutividade hidráulica saturada do solo,  $K_s$  e a sorvidade do solo  $S$ . A sorvidade exprime a capacidade do solo em absorver água na ausência de efeitos gravitacionais (PHILIP, 1969), sendo caracterizada na fase inicial da infiltração, quando há a predominância dos efeitos capilares e a gravidade pode ser desconsiderada. Sendo, dessa forma, um dos atributos mais empregados, juntamente com a condutividade hidráulica, para a caracterização hidrodinâmica de solos (PEREIRA e THOMAZ, 2016).

Uma série de equações de infiltração desenvolvidas por Haverkamp (1994) e ajustadas aos algoritmos BEST, permitem a estimativa das propriedades hidráulicas,  $K_s$  e  $S$ , a partir de modelos de fluxo unidimensional ( $I_{1D}$ ) e tridimensional ( $I_{3D}$ ) de água no solo. Para experimentos de infiltração com determinado potencial de pressão de água sobre superfície circular e conteúdo inicial de água uniforme ( $\theta_0$ ), a infiltração acumulada,  $I_{1D}$  e  $I_{3D}$ , e a taxa de infiltração para ambas as condições,  $q(t)$ , podem ser estimadas pelas equações para o regime de fluxo transitório (Eqs. 9, 10, 13 e 14) e estacionário (Eqs. 11, 12, 15 e 16) (Haverkamp et al., 1994), para as condições de fluxo:

#### Unidimensional ( $I_{1D}$ )

$$I_{1D} = S\sqrt{t} + bK_s t \quad (9)$$

$$q = S/2\sqrt{t} + bK_s \quad (10)$$

$$I_{1D\infty} = K_s t + c \frac{S^2}{K_s} \quad (11)$$

$$q_s = K_s \quad (12)$$

#### Tridimensional ( $I_{3D}$ )

$$I_{3D} = S\sqrt{t} + (aS^2 + bK_s)t \quad (13)$$

$$q = S/2\sqrt{t} + (aS^2 + K_s) \quad (14)$$

$$I_{3D\infty} = (aS^2 + bK_s)t + c\frac{S^2}{K_s} \quad (15)$$

$$q_s = aS^2 + K_s \quad (16)$$

com,

$$a = \frac{\gamma}{r\Delta\theta} \quad (17)$$

$$b = \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta + \frac{2-\beta}{3} \cdot \left(1 - \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta\right) \quad (18)$$

$$c = \frac{1}{2\left[1 - \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta\right] \cdot (1-\beta)} \cdot \ln\left(\frac{1}{\beta}\right) \quad (19)$$

em que, S é a sorvidade do solo [L T<sup>-1/2</sup>], r o raio do cilindro [L];  $\gamma$  igual a 0,75 e  $\beta$  igual a 0,6.

No BEST-slope, primeiramente a sorvidade do solo é determinada pelo ajuste dos dados de infiltração acumulada na Eq. 13. O ajuste é baseado na substituição da condutividade hidráulica em função da sorvidade e a taxa de infiltração em estado estacionário (Eq. 16) para a obtenção da Eq. 20 a seguir:

$$K_s = q_s^{exp} - aS^2 \quad (20)$$

No algoritomo BEST-intercept a restrição entre S e  $K_s$  é estabelecida a partir do intercepto  $B_\infty^{end} = c.S^2/K_s$  da expansão assintótica das Eqs. 11 e 15. Dessa forma,  $B_\infty^{end}$  é definido pela análise de regressão linear dos dados que descrevem as premissas do estado estacionário no gráfico de infiltração acumula em função do tempo, sendo então,  $K_s$  estimada pela Eq. 21.

$$K_s = c \frac{S^2}{B_{+\infty}^{end}} \quad (21)$$

Ajustando as Eqs. 9 e 13 à Eq. 21 têm-se as Eqs. 22 e 23, para I1D e I3D, respectivamente. As Eqs. 22 e 23, as quais são alternativas, respectivamente, às Eqs. 9 e 13, são utilizadas para a estimativa de S através do mesmo processo estabelecido para o BEST-slope, com o incremento do tempo de duração do experimento de infiltração no regime transitório pelo cálculo de  $t_k$ . A sorvidade é então utilizada para calcular  $K_s$  através da Eq.24.

$$I_{1D} = S\sqrt{t} + \left( bc \frac{S^2}{B_{+\infty}^{end}} \right) t \quad (22)$$

$$I_{3D} = S\sqrt{t} + \left( aS^2 + bc \frac{S^2}{B_{+\infty}^{end}} \right) t \quad (23)$$

$$K_s = c \frac{S^2}{B_{+\infty}^{end}} \quad (24)$$

Na alternativa BEST-steady é efetuada a combinação das Eqs. 9 e 24, para I1D, como também as Eqs. 13 e 24 para I3D, resultando, respectivamente, nas Eqs. 25 e 26 e, dessa maneira, S pode ser obtido a partir das Eqs. 27 e 28, para ambas as situações. Portanto,  $K_s$  pode ser estimada, para I1D, utilizando a Eq. 29 ou 24, e para I3D, através das Eqs. 20 ou 24.

$$q_s^{exp} = c \frac{S^2}{B_{+\infty}^{end}} \quad (25)$$

$$q_s^{exp} = aS^2 + c \frac{S^2}{B_{+\infty}^{end}} \quad (26)$$

$$S = \sqrt{\frac{q_s^{exp}}{c \frac{S^2}{B_{+\infty}^{end}}}} \quad (27)$$

$$S = \sqrt{\frac{q_s^{exp}}{a + c \frac{S^2}{B_{+\infty}^{end}}}} \quad (28)$$

$$K_s = q_s^{exp} \quad (29)$$

## 9 USOS E MANEJOS DO SOLO

A região semiárida do Nordeste brasileiro é caracterizada por uma forte escassez hídrica, em consequência do regime irregular de precipitação nessa localidade, com temperaturas relativamente altas e chuvas intensas e de curta duração, além da acentuada evapotranspiração potencial. Os solos dessa região, além de apresentarem baixa disponibilidade hídrica, o conteúdo de matéria orgânica é naturalmente reduzido, tornando-os passivos aos processos erosivos (SANTIAGO, 2015; ABAKER et al., 2018).

Atrelada às alterações climáticas, a região é ainda afetada pelas mudanças no uso e ocupação do solo, estas resultantes de ações antrópicas, através da substituição da cobertura vegetal nativa por sistemas agropastoris, aumentando a susceptibilidade do solo à degradação, devido à consequente redução das trocas gasosas, a movimentação de água pelo solo, a limitação no movimento de nutrientes e a diminuição das taxas de infiltração de água nesse meio (MARHAENTO et al., 2017; DA SILVA et al., 2017).

A superexploração dos recursos naturais na Caatinga, bioma predominante do semiárido brasileiro, tem sido impulsionada com o elevado uso do solo e a retirada da vegetação (SAMPAIO e MENEZES, 2002). Em áreas de produção agrícola, essencialmente em áreas irrigadas, os riscos de degradação no solo são intensificados, devido ao fenômeno de salinização, quando realizado o manejo inadequado do solo e drenagem deficiente. A monocultura e o uso contínuo de fertilizantes são práticas agrícolas que desencadeiam ainda mais os impactos ambientais no solo, propiciando uma agricultura expansiva a novas áreas da caatinga, acarretando assim, um desequilíbrio ao meio ambiente (SANTIAGO, 2015).

A conversão da vegetação Caatinga em pastagens tem afetado negativamente, uma vez que as condições atuais do bioma são desfavoráveis à recuperação natural da sua flora, sobretudo devido à baixa disponibilidade hídrica e de nutrientes (SANTOS et al., 2014). Tal mudança no uso do solo provoca diversas alterações às características desse recurso, causadas principalmente pelo pisoteio de animais sobre as áreas, promovendo a compactação do solo e consequentemente o aumento da densidade, a diminuição da porosidade e infiltração de água (TORRES et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2015).

Neste contexto, técnicas que visem a melhoria da qualidade e o adequado uso de manejo do solo, levando em consideração suas necessidades físicas, químicas e biológicas, são essenciais para assegurar a produtividade das áreas de pastagens, bem como auxiliar na sua recuperação (CARVALHO et al., 2017).

## 10 SISTEMAS AGROECOLÓGICOS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Uma técnica para o aumento da produtividade de solos e para a resiliência às condições climáticas do semiárido é a substituição de sistemas agrícolas convencionais para os sistemas agroecológicos. Tais práticas eliminam o uso de produtos químicos, impedindo a intoxicação humana e a contaminação do meio ambiente, e, além disso, proporcionam um manejo voltado à maior proteção dos recursos naturais, fundamentado na fixação de carbono, ciclagem de nutrientes e na segurança do cultivo (SANTIAGO, 2015).

A utilização desses sistemas promove um aumento considerável no conteúdo de matéria orgânica, o que propicia melhor qualidade ao solo devido a maior cobertura na sua superfície, resultante do acúmulo de resíduos vegetais (CORREA et al., 2009).

Dentre os sistemas de produção mais condizentes à execução dos padrões agroecológicos estão os sistemas agroflorestais (SAF's). Estes correspondem a uma alternativa para o uso do solo, gerando menos prejuízos ao meio ambiente quando comparados a sistemas de produção baseados em monocultivos (SANTOS et al., 2015). Além disso, dispõe de grande potencial mitigador da erosão do solo, mantendo ou até mesmo potencializando sua produtividade (MBOW et al., 2014).

No que diz respeito às condições climáticas, os agroecossistemas podem fornecer diferentes níveis de resistência aos impasses de uma determinada região, como a escassez hídrica, por exemplo, e também diferentes níveis de resiliência às mudanças climáticas prolongadas, como o aumento na temperatura, acúmulo das precipitações, intensificação das estiagens, entre outros (SILVA et al., 2018).

A agroecologia possibilita um local favorável à redução do processo de desertificação no semiárido, uma das maiores adversidades desta localidade. Este fato se dá, principalmente, pelas práticas inadequadas de manejo dos agroecossistemas e pelas atividades antrópicas, como extração da lenha para uso energético, resultando no desmatamento do bioma Caatinga. Deste modo, quando atrelado à ação do clima, mediante longos períodos de secas e das temperaturas elevadas, este cenário provoca uma situação bastante crítica, ao tempo que se exhibe como uma realidade característica da região semiárida do Brasil (SILVA et al., 2018).

## 11 REFERÊNCIAS

ABAKER, Wafa E .; BERNINGER, Frank; STARR, Mike. Mudanças nas propriedades hidráulicas do solo, umidade do solo e balanço hídrico em plantações de *Acacia senegal* de idades variadas no Sudão. **Journal of Arid Environments** , v. 150, p. 42-53, 2018.

ALAGNA, V. et al. Testing infiltration run effects on the estimated water transmission properties of a sandy-loam soil. **Geoderma**, v. 267, p. 24-33, 2016.

ALMEIDA, K. S. S. A. de et al. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado em Latossolo Amarelo Distrocoeso, no município de Cruz das Almas. **Irriga**, v. 22, n. 2, p. 259-274, 2017.

AL-SHAMMARY, Ahmed Abed Gatea et al. Métodos de estimativa da densidade do solo: uma revisão. **Pedofera**, v. 28, n. 4, pág. 581-596, 2018.

ALVES SOBRINHO, T.; GÓMEZ-MACPHERSON, H.; GÓMEZ, JA Um simulador portátil integrado de chuva e vazão terrestre. **Uso e Manejo do Solo**, v. 24, n. 2, pág. 163-170, 2008.

ALVES SOBRINHO, T.; FERREIRA, P. A. e PRUSKY, F. F. Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, 2002.

AMARAL, J. R. do et al. **Condutividade hidráulica saturada em solos na Bacia do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas-MG**. Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água - RBMCSA. Foz do Iguaçu, Paraná, 2016.

ANDRADE JUNIOR, A. S. et al. Determinação da curva de retenção de água no solo em laboratório. **Embrapa Meio-Norte**, 2007.

ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 4, p.382–388, 2009.

ANDRADE, Valesca Diniz et al. Capacidade de infiltração no solo em área de pastagem degradada e sistema ILP no primeiro ano. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 2, p. 6083-6087, 2020.

BAGARELLO, V; LOVINO, M, Testing the BEST procedure to estimate the soil ater retention curve, **Geoderma**, v,187–188, p, 67–76, 2012.

BAGARELLO, V.; IOVINO, M.; ELRICK, D. A. Simplified falling-head technique for rapid determination of fieldsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*. Madison, v. 68, p. 66-73, 2004.

BAGARELLO, Vincenzo; DI PRIMA, Simone; IOVINO, Massimo. Comparing alternative algorithms to analyze the Beerkan infiltration experiment. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, n. 3, p. 724-736, 2014.

BARRETO, A. N.; OLIVEIRA, G. R.; NOGUEIRA L. C; IVO, W. M. P. DE M. Condutividade hidráulica saturada em um solo aluvial do perímetro irrigado de São Gonçalo, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.1, p.152-155. 2001.

BARRETO, H. B. F.; BATISTA, R. O.; FREIRE, F. G. C.; SANTOS, W. O.; COSTA, F. G. B. Análises de indicadores de retenção e armazenamento de água no solo do perímetro irrigado Gorutuba, em Janaúba, MG. **Revista Verde**, Mossoró, v. 6, n. 5, p. 189-192, 2011.

BATISTA, Marcelo Augusto et al. Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral. BRANDÃO-FILHO, JUT; FREITAS, PSL; BERIAN, LOS; GOTO, R. **Hortaliças-fruto**. Maringá: EDUEM, p. 113-161, 2018.

BRADY, N.; WEIL, R. R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. **Bookman**. Porto Alegre, 3 ed., p. 686. 2013.

BRANDÃO, Viviane dos Santos et al. Resistência hidráulica da crosta formada em solos submetidos a chuvas simuladas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 13-22, 2006.

BRAUD, I.; DE CONDAPPA, D.; SORIA UGLADE, J. M.; HAVERKAMP, R.; ANGULO-JARAMILLO, R.; GALLE, S.; AND VAUCLIN, M. Use of scaled forms of the infiltration equation for the estimation of unsaturated soil hydraulic properties (the Beerkan method). **European Journal of Soil Science**, v.56, p.361-374, 2005.

BROOKS, R. ; COREY, T. HYDRAU uc propriedades de meios porosos. **Hydrology Papers, Colorado State University** , v. 24, p. 37, 1964.

BURDINE, NeT et al. Relative permeability calculations from pore size distribution data. **Journal of Petroleum Technology**, v. 5, n. 03, p. 71-78, 1953.

CARDUCCI, C.E.; OLIVEIRA, G.C.; ZEVIANI, W.M.; LIMA, V.M.P.; SERAFIM, M.E. Bimodal pore distribution on soils under conservation management system for coffee crop. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, p. 291-302, 2013.

CARVALHO, Wellyngton Tadeu Vilela et al. Pastagens degradadas e técnicas de recuperação: Revisão. **Pubvet**, v. 11, p. 0947-1073, 2017.

CASTELLINI, Mirko et al. The mechanical impact of water affected the soil physical quality of a loam soil under minimum tillage and no-tillage: An assessment using Beerkan multi-height runs and BEST-procedure. **Land**, v. 10, n. 2, p. 195, 2021.

CORREA, E. J. A. et al. Recursos Vegetais de Uso Tradicional para Diversificação de Agroecossistemas em Minas Gerais. **Cadernos de Agroecologia**, v. 4, n. 1, 2009.

COSTA, W.A.; OLIVEIRA, C. A. S.; KATO, E. Modelo de ajuste e métodos para determinação da curva de retenção de água de um Latossolo Vermelho Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.32, n.2, p.515-523, 2008.

DA SILVA, Paulo Ferreira et al. Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 147, p. 71-82, 2017.

DE MORAES, Moacir Tuzzin et al. Qualidade física do solo em sistemas de preparo e cultivo após duas décadas na região subtropical do Brasil. **Soil and Tillage Research** , v. 155, p. 351-362, 2016.

DE MORAES, Moacir Tuzzin; DEBIASI, Henrique; FRANCHINI, Julio Cezar. Resposta da soja e do trigo ao sistema de cultivo e preparo do solo após duas décadas em um latossolo vermelho. **Scientia Agraria** , v. 18, n. 3, pág. 146-153, 2017.

DE OLIVEIRA SILVA, Michelangelo et al. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 47838-47855, 2020.

DI PRIMA, Simone et al. Comparing Beerkan infiltration tests with rainfall simulation experiments for hydraulic characterization of a sandy-loam soil. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 20, p. 3520-3532, 2017.

DI PRIMA, S.; LASSABATÈRE, L.; BAGARELLO, V.; IOVINO, M.; ANGULO-JARAMILO. Testing a new automated single ring infiltrometer for Beerkan infiltration experiments. **Geoderma**, v. 262, p. 20-34, 2016.

DI PRIMA, S. et al. Laboratory testing of Beerkan infiltration experiments for assessing the role of soil sealing on water infiltration. **Catena**, v. 167, p. 373-384, 2018.

DORAN, John Walsh et al. **Defining soil quality for sustainable environment**. Wisconsin, US: Soil Science Society of America, 1994.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro, 212p. 1997.

EWING, Robert P .; HORTON, Robert. Condutividade térmica de uma rede cúbica de esferas com pontes capilares. **Journal of Physics D: Applied Physics** , v. 40, n. 16, pág. 4959, 2007.

FERNÁNDEZ-GÁLVEZ, J. et al.. A general Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters method predicting hydraulic parameters of any unimodal water retention and hydraulic conductivity curves: Application to the Kosugi soil hydraulic model without using particle size distribution data. **Advances in Water Resources**, v. 129, p. 118-130. 2019.

FERRAZ, F. de M. et al.. Estudo da condutividade hidráulica obtida em ensaios de campo: infiltração em sondagens e slug test em poços de monitoramento. **InterfaceHS – Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v.10, n.1, p.66-87. 2015.

FILGUEIRAS, Roberto et al. Modelos de curva de retenção de água no solo. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 115-115, 2016.

FOLONI, J. S. S.; LIMA, S. L.; BULL, L. T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 49-57, 2006.

FRANCHINI, Julio Cezar et al. Root growth of soybean cultivars under different water availability conditions. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 2, p. 715-724, 2017.

FUENTES, C.; VAUCLIN, M.; PARLANGE, J. Y.; HAVERKAMP, R. Soil water conductivity of a fractal soil. In: Baveye, P.; Parlange, J. Y.; Stewart, B. A. (eds.). **Fractals in soil science**. Boca Raton: CRC. cap. 11, p.333–340, 1998.

GARDNER, W. R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. **Soil science**, v. 85, n. 4, p. 228-232, 1958.

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

GREEN, W. H.; AMPT, G. A. Studies on soil physics-1. The flow of air and water through soils. **Journal of Agricultural Science**, v. 4, n. 1, p. 1-24, 1911.

HAVERKAMP, R. et al. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer: 2. Physically based infiltration equation. **Water Resources Research**, v. 30, n. 11, p. 2931-2935, 1994.

HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J. Y. Predicting the water retention curve from particle size distribution: I Sandy soils without organic matter. **Soil Science**, v.142, p.325–335, 1986.

HAVERKAMP, R. et al.. Scaling of the Richards equation and its application to watershed modeling. In: Sposito, G. (ed.). **Scale dependence and scale invariance in hydrology**. Cambridge: Cambridge University Press, p.190-223. 1998.

HILLEL, Daniel. Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations. **Elsevier**, 1998.

HORTON, R.E. Analysis of runoff-plot experiments with varying infiltration capacity. **Transactions American Geophysical Union**, v.20, p. 693-711, 1939.

JUNQUEIRA, R.; MELLO, C. R.; OLIVEIRA, A. S.; ALVES, G. J.; AIRES, U. R. V. Análise da condutividade hidráulica saturada em uma floresta de cedro em Madrid, Espanha. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 10, n. 3, p. 75-89, 2018.

KIEHL, A. J. Manual de edafologia: relações solo-planta. São Paulo: Ceres. 262 p. 1979.

KOSTIAKOV, An N. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity of studying it from the dynamic point of view for the purposes of amelioration. **Trans. Sixth Comm. Int. Soc. Soil Sci.**, v. 1, p. 7-21, 1932.

LASSABATERE, L. et al.. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments - BEST. **Soil Science Society of American Journal**, v.70, p.521-532, 2006.

LASSABATERE, L. et al. Beerkan multi-runs for characterizing water infiltration and spatial variability of soil hydraulic properties across scales. **Hydrological sciences journal**, v. 64, n. 2, p. 165-178, 2019.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Adv.Soil. Califórnia**, v. 1, n. 2, p. 277-294, 1985.

LEWIS, M. R.; MILNE, W. E. Analysis of border irrigation. **Agriculture En-gineering**, v. 19, n. 6, p. 267-272, 1938.

LISBOA, Fabrício Marinho et al. Indicadores de qualidade de Latossolo relacionados à degradação de pastagens. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 51, p. 1184-1193, 2016.

MARCHINI, D. C.; LING, T. G. C.; ALVES, M. C.; CRESTANA, S.; SOUTO FILHO, S. N.; ARRUDA, O. G. Matéria orgânica, infiltração e imagens tomográficas de Latossolo em recuperação sob diferentes tipos de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, p. 574-580, 2015.

MARHAENTO, Hero et al. Atribuição de mudanças no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica às mudanças no uso da terra usando o modelo SWAT. **Processos hidrológicos**, v. 31, n. 11, pág. 2029-2040, 2017.

MBOW, C.; SMITH, P.; SKOLE, D.; DUGUMA, L.; BUSTAMANTE, M. Achieving mitigation and adaptation to climate change through sustainable agroforestry practices in Africa. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 6, p. 8-14, 2014.

DE SOUZA MEDEIROS, Aldair et al. Soil carbon losses in conventional farming systems due to land-use change in the Brazilian semi-arid region. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 287, p. 106690, 2020.

MEYER, L. D.; HARMON, W. C. Simulador de chuva de intensidade múltipla para pesquisa de erosão em encostas de fileiras. **Transações da ASAE**, v. 22, n. 1, pág. 100-0103, 1979.

MEYER, Philip D.; GEE, Glendon W. Estimativa baseada em fluxo da capacidade de campo. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 125, n. 7, pág. 595-599, 1999.

MINOSSO, Joslaine; ANTONELI, Valdemir; DE FREITAS, Andreza Rocha. Variabilidade sazonal da infiltração de água no solo em diferentes tipos de uso na região sudeste do Paraná. **Geographia Meridionalis**, v. 3, n. 1, p. 86-103, 2017.

MONTEBELLER, Claudinei A. et al. Avaliação hidráulica de um simulador de chuvas pendular. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 1-5, 2001.

MONTOYA-DOMINGUEZ, Juan David; GARCÍA-ARISTIZÁBAL, Edwin Fabián; VEGA-POSADA, Carlos Alberto. One-dimensional experimental study of rainfall infiltration into unsaturated soil. **Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia**, n. 82, p. 74-81, 2017.

MUALEM, Yechezkel. Hysteretical models for prediction of the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water resources research**, v. 12, n. 6, p. 1248-1254, 1976.

NERY, Aparecida Rodrigues et al. INFILTRAÇÃO DA ÁGUA NOS SOLOS CULTIVADOS COM PALMA FORRAGEIRA E PASTAGEM NO IFCE CAMPUS CRATO. **Revista Acta Kariri-Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 2, n. 1, 2020.

NETO, Gustavo Klinke; OLIVEIRA, Anna Hoffmann; PEREIRA, Sueli Yoshinaga. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em uma sub-bacia as margens do rio Mogi Guaçu (SP). **Geociências** (São Paulo), v. 36, n. 2, p. 381-394, 2017.

NETTO, André Maciel et al. Caracterização hidrodinâmica e hidrodispersiva de um latossolo amarelo na microrregião do brejo paraibano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 86-96, 2013.

NIELSEN, K. T. et al.. Automated rainfall simulator for variable rainfall on urban green areas. **Hydrological Processes**, v. 33, n. 26, p. 3364-3377, 2019.

OLIVEIRA, D. B. C.; SOARES, W. A. Desempenho de modelos de infiltração tridimensional de água no solo. **Revista Diálogos**, v. 2, n. 18, p. 519-544, 2017.

OLIVEIRA, G. G.; M, G. C.; SILVA, E. A.; CARDUCCI, C. E.; BARBOSA, S. M.; SILVA, B. M. Indicadores de qualidade física para Argissolos sob pastagens nas regiões leste e sul de Minas Gerais. **Revista Ciências Agrárias**, v. 58, n. 4, p. 388-395, out./dez. 2015.

OLNESS, A.; CLAPP, C. E.; LIU, R.; PALAZZO, A. J. Biosolids and their effects on soil properties. In: WALLACE, A.; TERRY, R. E. (Eds.). **Hand book of soil conditioners**. New York: Marcel Dekker. p. 141-165, 1998.

PANACHUKI, ELÓI. Infiltração de água no solo e erosão hídrica, sob chuva simulada, em sistema de integração agricultura-pecuária. **Universidade Federal De Mato Grosso Do Sul Campus De Dourados**. Dourados, 2003.

PENNER, G. C. et al. Evaluation of hydraulic conductivity in the non-saturated soil region in the hydrographic basin of sapucajuba creek (Belém-Pa). **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 7, p. 8954-8964, 2019.

PEREIRA, A.A.; THOMAZ, E.L. **Condutividade hidráulica e sorvidade em áreas sob diferentes sistemas de uso e manejo**. Simpósio Nacional de Geomorfologia, 11, Maringá, Paraná, 2016.

PHILIP, J. R. The theory of infiltration. **Advances in Hydroscience**. v. 5, p. 215-297. 1969.

PHILIP, J. R. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. **Soil science**, v. 83, n. 5, p. 345-358, 1957.

PIZARRO, F. Drenagem agrícola y recuperacion de suelos salinos. Madrid, Editorial Agrícola Española, p. 521, 1978.

RAMOS, T. B.; GONÇALVES, M. C.; PEREIRA, L. S. Características de retenção de água no solo para utilização na rega das culturas. **Funções de pedotransferência para solos, 1st edn. Iniav, Oeiras**, v. 1, 2016.

REYNOLDS, W.D.; DRURY, C.F.; YANG, X.M. & TAN, C.S. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. **Geoderma**, 146:466-474, 2008.

REYNOLDS, W. D. et al. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, v. 152, n. 3-4, p. 252-263, 2009.

RIGHI, C. A. Sistemas Agroflorestais: definição e perspectivas. In:Ciro Abbud Righi; Marcos Silveira Bernardes. (Org.). **Cadernos da Disciplina de Sistemas Agroflorestais**. 1. ed. Piracicaba: Ciro Abbud Righi & Marcos Silveira Bernardes, v. 1, p. 1-5, 2015.

RICHARDS, L.A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGER, L.E.; CLARK, F.E. (Ed.). *Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling*. **Madison: American Society of Agronomy**, p.128-152, 1965.

SAMPAIO, E. V. S. B.; MENEZES, R. S. C. Perspectivas de uso do solo no semi-árido nordestino. **500 anos de uso do solo no Brasil**, 2002.

SANTIAGO, F. S. Avaliação da qualidade do solo em sistemas de cultivo irrigado agroecológico e convencional no semiárido do Rio Grande do Norte. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, 175f. Recife. 2015.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, J. F. C. B. C.; SILVA, R. M. da. Caracterização hidrodinâmica dos solos da bacia experimental do Riacho Guaraíra utilizando o Método Beerkan. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 4, p. 149-160, 2012.

SANTOS, J. N.; PEREIRA, E. D. Carta de susceptibilidade a infiltração da água no solo na sub-bacia do rio Maracanã-MA. **Cadernos de Pesquisa**, São Luís, V. 20, n. especial, 2013.

SANTOS, Mauro G. et al. Caatinga, a floresta tropical seca brasileira: ela pode tolerar as mudanças climáticas?. **Fisiologia Vegetal Teórica e Experimental**, v. 26, n. 1, pág. 83-99, 2014.

SANTOS, W.M. et al.. Comparativo de impactos ambientais entre manejo de culturas: sistema agroflorestal e monoculturas. **Cadernos de Agroecologia**, v. 10, n. 3, , 5 p. 2015.

SCHEMBERGUE, Altamir et al. Sistemas Agroflorestais como Estratégia de Adaptação aos Desafios das Mudanças Climáticas no Brasil 2. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 55, p. 9-30, 2017.

SILVA, D. V. et al. Agroecologia e Convivência com o Semiárido Brasileiro: uma análise preliminar. **Diversitas Journal**, v. 3, n. 1, p. 76-84, 2018.

SILVA JÚNIOR, M.A.B.; SILVA, S.R.; SOARES, W.A. Parâmetros de infiltrabilidade em solo urbano para modelo chuva-vazão. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v.12, n.3, p.135-143, 2016.

SILVA, J. R. I. et al. Efeito de diferentes usos do solo na erosão hídrica em região semiárida. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 27, n. 3, p. 272-283, 2019.

SOARES, W. A. Determinação dos parâmetros hídricos do solo por meio da simulação computacional do processo de infiltração. **Diálogos: revista de estudos culturais e da contemporaneidade**, v. 1, n. 3, p. 73-84, 2010.

SOUSA, F. P. et al. Carbon and nitrogen in degraded Brazilian semi-arid soils undergoing desertification. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 148, p. 11-21, 2012.

SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; ANGULO-JARAMILLO, R.; NETTO, A. M. Caracterização hidrodinâmica de solos: Aplicação do método Beerkan1. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**. v. 12, n. 2, p. 128-135, 2008.

SOUZA, F. A.; RODRIGUES, S. C. Estimativa de recarga do lençol freático em solos sobre granito e gabros alcalinos na alta bacia do rio dos Boise m Iporá –GO. **Ambiência**, v.10, n.2, 2014.

SPOHR, Renato Beppler et al. Desenvolvimento e validação de um simulador de chuvas portátil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 2, p. 411-417, 2015.

STEFANOSKI, Diane C. et al. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 17, p. 1301-1309, 2013.

THOMASSON, A.J. Towards an objective classification of soil structure. **Journal of Soil Science**, v.29, p.38-46, 1978.

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

TORRES, Lorena Chagas; BARROS, Katiane Raquel Mendes; LIMA, Herdjaniana Veras de. Alterações na qualidade física de um latossolo amarelo sob pastagem. **Acta Amazonica**, v. 44, n. 4, p. 419-426, 2014.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VIEIRA, S.R.; CASTRO, O.M. Determinação em laboratório, de curvas de retenção de água com tensiômetros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.11, n.2, p.87-90, 1987.

VILARINHO, Marcella Karoline Cardoso et al. Velocidade de Infiltração Básica de um Plintossolo Pétrico Situado em Áreas de Pastagem e Cerrado. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 13, n. 2, p. 3336, 2019.

WANG, C.; MAO, X; HATANO, R. Modelagem da infiltração de poços em solos de textura fina com intercalação grosseira. **Soil Science Society of America Journal**, v.78, p.745-753, 2014.

YILMAZ, Deniz et al. Hydrodynamic characterization of basic oxygen furnace slag through an adapted BEST method. **Vadose Zone Journal**, v. 9, n. 1, p. 107-116, 2010.

ZATARÁIN, F. et al. Predicción de la forma de la característica de humedad del suelo a partir de la curva granulométrica. In: **Congreso Nacional de Irrigación**. p. 212-219. 2003.

ZHANG, Yong-wang; SHANGGUAN, Zhou-ping. A mudança do armazenamento de água no solo em três tipos de uso do solo após 10 anos no Planalto de Loess. **Catena**, v. 147, p. 87-95, 2016.

## **CAPÍTULO 2 - SORVIDADE E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA OBTIDAS COM INFILTRÔMETROS DE ASPERSÃO E ANEL SIMPLES EM ÁREAS DE PASTO, CAATINGA E SISTEMA AGROFLORESTAL**

### **1 INTRODUÇÃO**

Os impactos sobre a agricultura do semiárido estão cada vez mais variáveis e imprevisíveis, uma vez que têm sido criadas as condições para a generalização dos extremos climáticos, sobretudo dos longos períodos de estiagem. Os sistemas agrícolas e pecuários do semiárido brasileiro são afetados por um intenso processo de devastação provocado pelo uso insustentável dos recursos naturais. Em vista disso, surge o movimento agroecológico em defesa e na promoção de formas mais sustentáveis de produção agrícola (WEID, 2012).

Diante desse contexto, faz-se necessário estudar como esses sistemas conferem maior capacidade de resistência à seca e conseqüentemente proporcionam menor vulnerabilidade e maior sustentabilidade aos sistemas agrícolas da região.

Há uma necessidade premente de compreender o funcionamento dos sistemas agroecológicos durante os períodos de limitação de água, para avaliar a sua capacidade de recuperação. Compreender esse sistema agrícola associado com a dinâmica da água no solo é essencial na previsão das taxas futuras e as conseqüências das mudanças globais.

O conhecimento acerca das propriedades hidrodinâmicas do solo tem fundamental importância para a simulação de processos hidrológicos, contribuindo para a resolução de problemas associados à conservação do meio ambiente, da agricultura e dos recursos hídricos (DOS SANTOS et al., 2018). A condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_s$ ) e a sorvidade ( $S$ ) são propriedades relevantes para os estudos hidrológicos, essencialmente no âmbito da infiltração. Essas propriedades exercem uma influência dominante nos processos de formação do escoamento superficial direto, podendo implicar na geração de enchentes, erosão e transporte de sedimentos e solutos no solo (PINHEIRO et al., 2017).

Diversos métodos estão disponíveis para a determinação da sorvidade e da condutividade hidráulica do solo saturado, sejam eles de campo ou laboratório. A determinação em campo dessas propriedades é geralmente mais empregada, devido à sua maior representatividade para a área em estudo e sua aplicação de forma rápida e de baixo custo (PENNER et al., 2019).

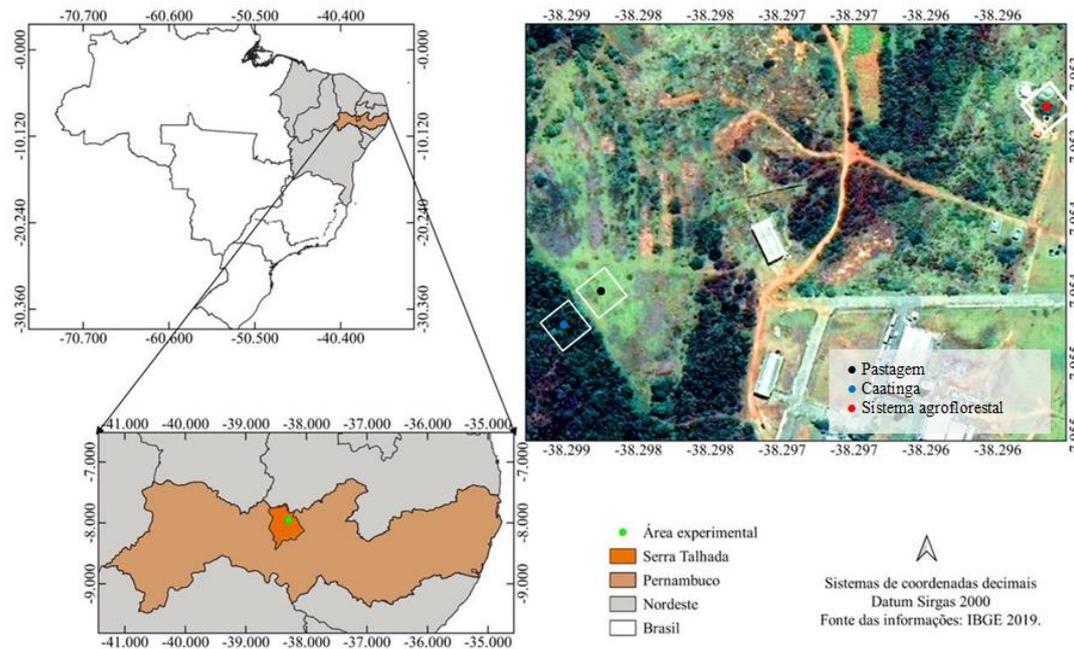
Alguns autores (BAGARELLO et al., 2014a; ALAGNA et al., 2016) realizaram a caracterização hidráulica do solo a partir do programa BEST (*Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters*), que possibilita a determinação de S e  $K_s$  a partir de medidas de infiltração em campo. Estes autores também constataram que a obtenção de  $K_s$  a partir de ensaios de infiltração com o infiltrômetro de anel simples, aplicando água a uma determinada altura superfície do solo, é mais adequada para simular a formação de escoamento superficial em eventos de chuvas intensas, devido à similaridade da sua energia potencial gravitacional com a energia cinética da chuva simulada.

Desta forma, objetivou-se avaliar, neste capítulo, a influência de diferentes sistemas de uso e manejo do solo sobre a sorvidade e condutividade hidráulica saturada, obtidas a partir de experimentos com infiltrômetros de aspersão e de anel simples. Além disso, realizar uma comparação entre os métodos em termos de medidas de infiltração e estimativas das propriedades hidráulicas do solo.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

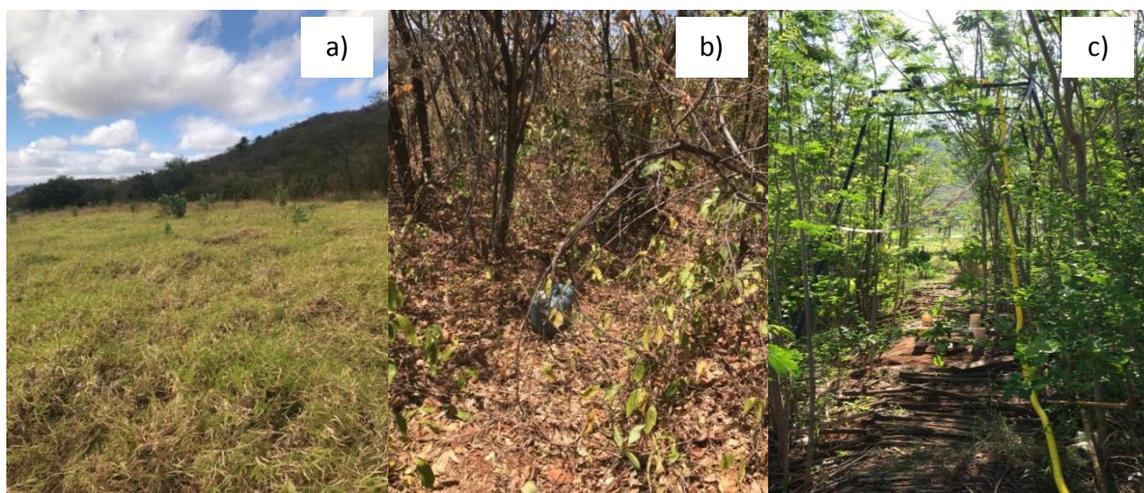
### **2.1 ÁREA DE ESTUDO**

O estudo foi conduzido no município de Serra Talhada, no campus da Universidade Federal Rural de Pernambuco, localizado na Microrregião do Vale do Pajeú, nos domínios da bacia hidrográfica do Rio Pajeú, a qual está inserida, em sua totalidade, no estado de Pernambuco, entre as coordenadas geográficas de 07°16' 20" e 08°56' 01" de latitude Sul e 36°59' 00" e 38° 57' 45" de longitude a Oeste de Greenwich. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo BShw', semiárido, quente e seco, com chuvas de verão-outono entre os meses de janeiro e maio, média de precipitação pluvial anual de aproximadamente 647 mm.ano<sup>-1</sup> e média térmica do ar correspondente a 25°C.



**Figura 1.** Mapa de localização da área experimental.

Foram selecionadas três áreas, uma de pasto cultivado com capim-corrente (*Urochloa mosambicensis*) e orelha de onça (*Macroptilium martii*), uma com cobertura vegetal de Caatinga com predominância de espécies vegetais de estrutura arbóreo-arbustiva e a terceira um sistema agroflorestal (SAF) composto por culturas agrícolas em consórcio com espécies arbóreas, entre elas, a palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill), Leucena (*Leucaena leucocephala*), mamona (*Ricinus communis*) e Angico (*Anadenanthera colubrina*). A área de pastagem tinha um histórico de uso há 20 anos. Os solos das áreas são classificados, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, como Cambissolos Háplicos Ta Eutróficos Típicos (EMBRAPA, 2006).



**Figura 2.** Áreas de pasto (a), Caatinga (b) e sistema agroflorestal (c).

## 2.2 AMOSTRAGEM E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO

Um total de 16 amostras de solos indeformadas (5 cm de altura por 5 cm de diâmetro) foram coletados com um trado tipo Uhland nas camadas de 0-10 cm (8 amostras) e 10-20 cm (8 amostras), em pontos escolhidos aleatoriamente, dentro de 200 m<sup>2</sup> de cada área de estudo. Com essas amostras foram determinadas a densidade do solo  $\rho_s$  (g cm<sup>-3</sup>) e o teor de água inicial  $\theta_0$  (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) no solo, obtidas antes das medidas com os infiltrômetros de aspersão e de anel simples (Figura 3). A porosidade total do solo,  $\phi$  (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), foi calculada através da equação  $\phi = 1 - \rho_s/\rho_p$ , sendo  $\rho_p$  (g cm<sup>-3</sup>) a densidade de partículas. A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico, no qual relaciona a massa do solo seco em estufa pelo volume de álcool necessário para preencher a macro e micro porosidade presentes no mesmo (EMBRAPA, 1997).

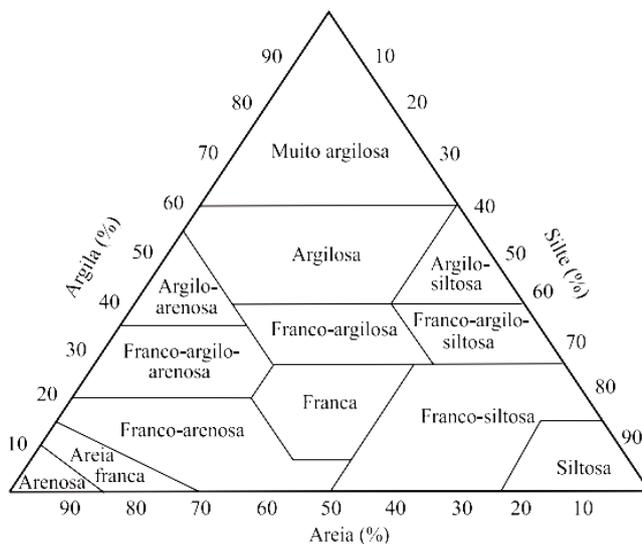


**Figura 3.** Coleta das amostras de solo indeformadas com trado tipo Uhland.

Oito amostras de solo deformadas dos 20 cm superiores do solo também foram coletadas para a obtenção da curva granulométrica e consequente identificação textural, bem como para determinação das densidades de partículas. Aproximadamente 500g de solos foram acondicionadas em sacos plásticos, e em seguida, levadas ao laboratório para a realização das análises.

O ensaio de granulometria foi realizado de acordo com o manual de métodos de análise do solo, elaborado pela Embrapa, pelo método do densímetro e peneiramento mecânico a seco após o pré-tratamento para a dispersão do solo, com solução de hexametafosfato de sódio e agitação mecânica (TEIXEIRA et al., 2017).

Na classificação textural dos solos, foi utilizado o triângulo textural (Figura 4) com 13 classes descritas por Lemos e Santos (1984) e os valores das frações areia, silte e argila obtidos através da análise granulométrica.



**Figura 4.** Triângulo de classificação textural de solos. Fonte: Lemos e Santos (1984).

### 2.3 INFILTRÔMETRO DE ASPERSÃO

Para as medidas de infiltração de água no solo por aspersão, usou-se um simulador de chuvas (Figura 5), desenvolvido com base no modelo proposto por Meyer e Harmon (1979). O equipamento possui armação retangular apoiada em quatro pés reguláveis e no centro desta um bico aspersor tipo VeeJeet 80-150 foi instalado a 3,00 m da superfície do solo. O simulador foi calibrado com testes de duração de 60 minutos, utilizando uma pressão constante de 51 kPa, controlada por um manômetro situado próximo ao aspersor. O dispositivo foi acionado por uma motobomba elétrica instalada a um reservatório de água, o qual alimenta todo o conjunto.

A intensidade média da chuva, 139,98 mm/h, e a uniformidade de aplicação da água, 75,92%, foram obtidas por meio da utilização de 30 pluviômetros com área de 78,54 cm<sup>2</sup>,

distribuídos dentro da área de 1 m<sup>2</sup> de aspersão, no laboratório de hidráulica da UAST (Figura 5).



**Figura 5.** Infiltrômetro de aspersão com pluviômetros no interior da área útil (a), exposição da bandeja à chuva simulada (b), amostras após a exposição (c) e separação dos grânulos por peneiramento (d).

O diâmetro médio das gotas incidentes sobre a superfície e a energia cinética,  $33,02 \text{ Jm}^{-2}\text{mm}^{-1}$ , foram determinadas através do método da farinha descrito por Hudson (1964). Para a determinação foram utilizadas três bandejas de plástico contendo farinha de trigo, as quais ficaram expostas à precipitação durante um período de 3 a 4 segundos aproximadamente. Após a exposição à chuva simulada, os grânulos com farinha contidos nas bandejas foram secos ao ar por 24 horas e em seguida separados por peneiramento manual (Figura 5),

utilizando-se peneiras de 4; 2; 1; e 0,5 mm. Posteriormente, os grânulos foram levados à estufa para a secagem por 24 horas a 105° C, sendo então pesados em balança eletrônica para a obtenção da massa média dos mesmos.

Para as medidas de infiltração por aspersão, foram simuladas doze chuvas de aproximadamente 1 hora de duração em diferentes locais das áreas experimentais. Durante a seleção dos pontos amostrais foi considerada uma inclinação entre 3° e 5°, para garantir a representatividade das parcelas.

Oito ensaios de simulação foram realizados com calhas em formato de anéis de 0,58 m de diâmetro (0,246 m<sup>2</sup> de área) introduzidas no centro de uma área de 1 m<sup>2</sup> de aspersão, esta delimitada por uma estrutura de tubos PVC interligados (Figura 6b). A infiltração em torno das calhas contribui impedindo que a redistribuição da água nos poros se processe no sentido lateral e reduza os chamados efeitos de bordadura, garantindo assim uma infiltração com direção predominantemente vertical dentro do anel.

Durante os testes das medidas por aspersão, alguns fatores como a vegetação e os ventos, provocaram variações na intensidade da precipitação inicialmente calibrada, interferindo na homogeneidade do volume produzido. Desse modo, a cada execução, foram dispostos quatro pluviômetros nas laterais esquerda, direita, inferior e superior da área de aspersão, e ao final de cada ensaio foi verificada a intensidade de precipitação.



**Figura 6.** Ensaios com o simulador de chuva sob a utilização do anel de 0,58 m de diâmetro (a) e detalhe da instalação da parcela em campo (b). Ensaio de simulação de chuva com anéis de 0,09 m de diâmetro (c) e detalhe da parcela experimental (d).

Os outros quatro testes foram realizados em 16 anéis com 0,09 m de diâmetro ( $6,4 \times 10^{-3} \text{ m}^2$  de área de plotagem e  $0,94 \text{ m}^2$  de área de bordadura), ou seja, quatro para cada simulação, conforme a Figura 6d. Todos os anéis foram adaptados com tubo de drenagem para coletar o escoamento superficial na saída.

No momento dos testes, o simulador foi posicionado sobre as calhas de modo que o bico aspersor estivesse na faixa central da área de aspersão. As quatro primeiras coletas do escoamento ocorreram com um intervalo de 2,5 minutos a partir do instante inicial do escoamento superficial. As respectivas coletas foram realizadas em intervalos de 5 minutos até o tempo final aproximado de 60 minutos de simulação. O escoamento captado através dos

tubos foi direcionado a potes plásticos previamente identificados, e ao final de cada teste, transferidos para recipientes de volume conhecido para a leitura.

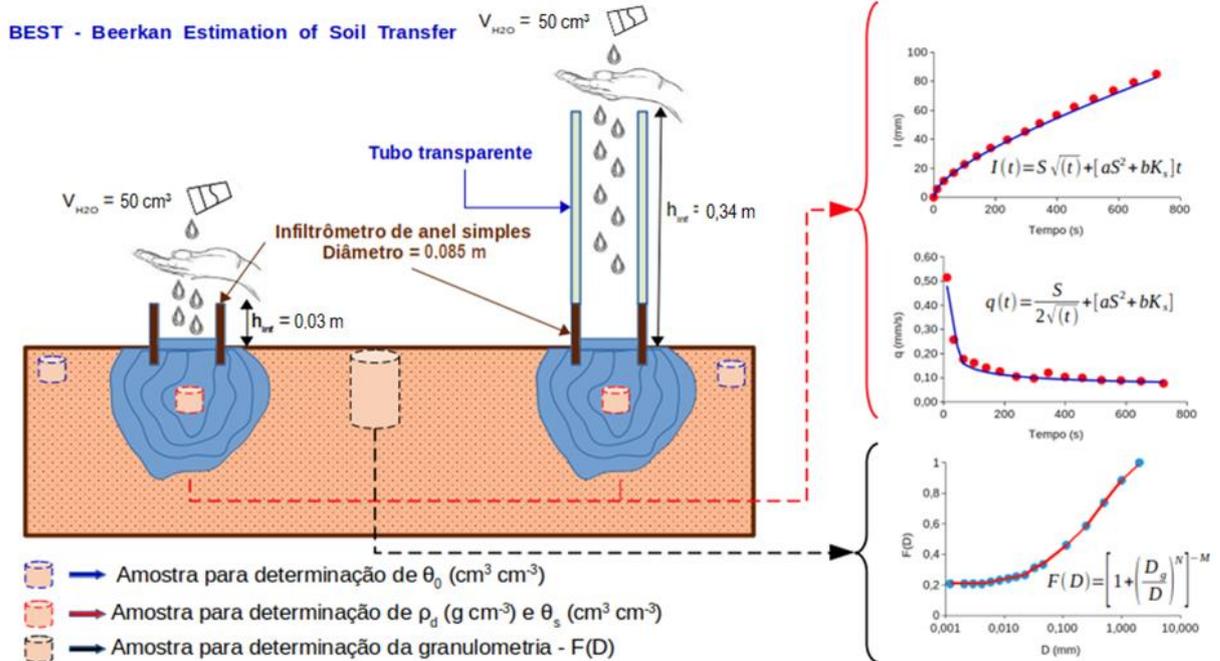
Durante os ensaios com o infiltrômetro aspersor, foram coletadas, ainda, amostras indeformadas para a determinação da densidade do solo ( $\rho_s$ ) e amostras deformadas para determinação dos teores de umidade inicial ( $\theta_0$ ) e final ( $\theta_s$ ). A coleta das amostras de solo indeformadas procedeu-se em anéis de PVC, com volume de 98,17 cm<sup>3</sup>, sendo a densidade do solo definida conforme metodologia de Teixeira et al., (2017), pelo quociente da massa da amostra de solo seco em estufa a 105° C por 24 horas e o seu volume total, equivalente ao volume interno do anel.

## 2.4 INFILTRÔMETRO DE ANEL SIMPLES

As operações com infiltrômetro de anel simples foram realizadas com o procedimento proposto por Bagarello et al., (2014) e Alagna et al., (2016). Um anel de 0,085 m de diâmetro inserido a uma profundidade de 0,01 m foi utilizado para as avaliações seguindo o pressuposto da metodologia *Beerkan* (SOUZA et al., 2008; LASSABATÉRE et al., 2006).

Um total de 32 medidas de infiltração foi executado de maneira aleatória nas áreas de estudo. Para cada ensaio de infiltração foram vertidos sucessivamente de 15 a 20 volumes de água, cada um com 50 cm<sup>3</sup>, na superfície confinada do anel, e anotado o tempo que os volumes constantes de água levam para infiltrar até o fluxo atingir o regime permanente (*steady state*).

As medidas de infiltração foram realizadas aplicando-se água sob duas condições de altura do fornecimento de água ( $h_{inf}$ ), dissipando a energia com os dedos das mãos para minimizar a perturbação causada pelo impacto da água sobre o solo (REYNOLDS, 1993). Em dezesseis ensaios de infiltração a água foi vertida a  $h_{inf} = 0,03$  m, e nos outros dezesseis vertida a  $h_{inf} = 0,34$  m, de modo a estabelecer uma comparação entre as medidas realizadas com os infiltrômetros de anel simples e de aspersão (Figura 7), caracterizadas, respectivamente, pela energia potencial gravitacional e energia cinética.



**Figura 7.** Esquematização das medidas de infiltração realizadas com altura  $h_{inf} = 0,03 \text{ m}$  (sem o tubo) e altura  $h_{inf} = 0,34 \text{ m}$  (com o tubo).

Nos locais de testes procedeu-se a limpeza da superfície do solo, deixando-a desprotegida de vegetação, de modo a maximizar os efeitos das gotas de chuva. Para assegurar a verticalidade da água vertida no anel e evitar o efeito do vento, um tubo transparente foi utilizado para as medidas com  $h_{inf} = 0,34 \text{ m}$  (Figura 8b).



**Figura 8.** Ensaio de infiltração de água no solo a anel simples com altura de despejo de 0,03 m (a) e 0,34 m (b).

Nesta investigação, considerando a massa de água e altura de queda já conhecidas, as medições foram então caracterizadas pelos valores de energia potencial  $E_p = 0,014 \text{ J}$  para a altura de despejo de  $0,03 \text{ m}$  e  $E_p = 0,166 \text{ J}$  para a altura de  $0,34 \text{ m}$ , através da equação:

$$E_p = m \times g \times h \quad (1)$$

onde  $m$  (Kg) é a massa de água,  $g$  ( $\text{m s}^{-2}$ ) é a aceleração gravidade local e  $h$  (m) é a altura de queda de água.

Assim como nas operações com o infiltrômetro aspersor, amostras de solo também foram coletadas anteriormente e logo após cada teste de infiltração com o anel simples, para a determinação da densidade do solo e das umidades inicial  $\theta_0$  e final  $\theta_s$ .

## 2.5 ALGORITMO BEST

O algoritmo BEST-steady (BAGARELLO et al., 2014b) foi utilizado para a determinação da condutividade hidráulica saturada,  $K_s$  ( $\text{mm s}^{-1}$ ), e da Sorvidade do solo,  $S$  ( $\text{mm s}^{-1/2}$ ), descritas para a equação da infiltração unidirecional ( $I_{1D}$ ) ajustadas às medidas obtidas com os infiltrômetros de aspersão:

$$K_s = q_s^{exp} \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{K_s}{b_s}} \quad (3)$$

Enquanto que para as medidas com o infiltrômetro de anel simples (*Beerkan*),  $K_s$  e  $S$  são obtidas a partir de ajustes da equação da infiltração tridimensional axissimétrica ( $I_{3D}$ ):

$$K_s = \frac{c q_s^{exp}}{a b_s + c} \quad (4)$$

$$S = \sqrt{\frac{q_s^{exp}}{a + \frac{c}{b_s}}} \quad (5)$$

sendo  $q_s^{\text{exp}}$  a taxa de infiltração no estado estacionário e  $b_s$  a interceptação associada,  $a$  ( $\text{mm}^{-1}$ ) e  $c$  são variáveis auxiliares definidas para o caso específico da relação de Brooks & Corey (1964) como:

$$a = \frac{\gamma}{r(\theta_s - \theta_0)} \quad (6)$$

$$c = \frac{1}{2 \left[ 1 - \left( \frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta \right]^{(1-\beta)}} \ln \left( \frac{1}{\beta} \right) \quad (7)$$

sendo  $\gamma$  e  $\beta$  coeficientes geralmente definidos em 0,75 e 0,6, respectivamente, para a maioria dos solos em que a umidade volumétrica inicial do solo,  $\theta_0$ , é menor que 25% de  $\theta_s$  (HAVERKAMP et al., 1994);  $r$  (mm) é o raio do infiltrômetro, e  $\eta$  um parâmetro de forma que é estimado a partir da curva de distribuição dos tamanhos das partículas  $F(D)$  e da porosidade do solo.

Nesse estudo, ao considerar que todas as execuções atingiram o estado estacionário, a utilização do método BEST-steady fez-se necessária, uma vez que este, quando comparado aos demais algoritmos, possui uma maior sensibilidade na caracterização de solos com regimes de fluxo nesta fase (DI PRIMA et al., 2016).

Uma comparação quantitativa entre os valores de  $S$  e  $K_s$  obtidos a partir dos experimentos com infiltrômetros de aspersão e de anel simples também foi realizada.

## 2.6 PROCEDIMENTO ESTATÍSTICO

Todas as análises estatísticas foram conduzidas usando o software estatístico R 3.0.0 (TEAM, 2013). Os dados foram analisados para normalidade de distribuição pelo teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO & WILK, 1965) e homogeneidade de variância pelo teste Levene (KASSAMBARA, 2019). Satisfeitas as premissas, realizou-se a Análise de Variância ANOVA (two-way), seguida do pós-teste de Tukey HSD a 5%, 1%, 0,1% e 0% de probabilidade para a comparação das médias.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os solos estudados apresentaram texturas similares, realçadas por um elevado teor de areia com pouca diferenciação entre as camadas (0-10 e 10-20 cm), sendo todos os solos enquadrados na classe textural franco-arenosa. De maneira geral, todos os solos mostraram pouca variação na densidade média das partículas ( $\rho_p$ ). Logo, o volume efetivamente ocupado por partículas sólidas desses solos não diferiram (Tabela 1).

**Tabela 1.** Caracterização das propriedades físicas dos perfis de solos das áreas de pasto, Caatinga e sistema agroflorestral.

Camadas (cm)	Areia ------(%)-----	Silte	Argila	$\rho_s$ ----(g cm <sup>-3</sup> )----	$\rho_p$	$\phi$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )
<b>Pasto</b>						
0-10	68,77±1,63	21,59±1,49	9,64±0,80	1,37±0,11ab	2,67±0,03	0,487±0,04ab
10-20	65,84±1,47	24,62±1,87	9,54±1,10	1,47±0,04c	2,64±0,02	0,447±0,02c
<b>Caatinga</b>						
0-10	66,39±1,84	22,90±2,29	10,71±1,38	1,31±0,06a	2,66±0,05	0,508±0,02a
10-20	64,93±1,38	24,42±1,75	10,65±1,27	1,34±0,07a	2,65±0,04	0,496±0,03a
<b>SAF</b>						
0-10	68,45±3,72	19,57±3,25	11,97±1,04	1,32±0,17a	2,65±0,02	0,503±0,07a
10-20	66,24±2,69	21,02±1,72	12,73±1,39	1,46±0,10bc	2,64±0,02	0,450±0,04bc

sendo  $\rho_s$  a densidade do solo,  $\rho_p$  a densidade de partículas,  $\phi$  a porosidade total. Para uma determinada variável, médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente entre as áreas dentro de cada camada pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

A densidade de solo expressa a relação existente entre massa de sólidos e o volume total de um solo. O solo de Caatinga foi o único que não apresentou diferença nos valores de  $\rho_s$  entre as camadas. Esta aproximação nos valores encontrado para  $\rho_s$  entre as camadas permite dizer que o solo da Caatinga caracteriza-se como um solo solto e poroso, justificando a similaridade nos valores de  $\phi$  encontrados nas mesmas camadas da Caatinga (Tabela 1).

### 3.1 EXPERIMENTOS COM INFILTRÔMETRO DE ASPERSÃO

As medidas realizadas com o simulador de chuva reproduziram com fidelidade o processo de infiltração na maioria dos pontos localizados nas áreas de Caatinga e pasto. No entanto, nas áreas sob o sistema agroflorestral, nenhum escoamento superficial foi gerado durante as simulações de 1 hora. Este evento está relacionado ao fato de que os sistemas agroflorestrais proporcionam modificações na estrutura do solo, que conferem melhores condições físico-hídricas a esse meio, favorecendo o processo de infiltração de água, e

consequentemente a redução do escoamento superficial (TUCCI, 1997; BARBOSA et al., 2017).

As medidas de infiltração por aspersão permitiram a obtenção do tempo de início do escoamento superficial ( $t_e$ ), coeficiente de escoamento (C), intensidade média de chuva ( $i_c$ ) e taxa de infiltração da água no solo no regime estacionário ( $q_s$ ) para as calhas cilíndricas de 0,09 e 0,58 m de diâmetro, realizados nos solos de Caatinga e pasto (Tabela 2).

**Tabela 2.** Estatística descritiva do tempo do início de escoamento,  $t_e$  (s), coeficiente de escoamento, C, intensidade de chuva,  $i_c$  ( $\text{mm s}^{-1}$ ) e taxa de infiltração da água no solo no regime estacionário,  $q_s$  ( $\text{mm s}^{-1}$ ), obtidos a partir de simulações de chuvas realizadas nas áreas de pasto e de Caatinga.

	Diâmetro da calha		Estatística	$t_e$ (s)	C (adim)	$i_c$ ( $\text{mm s}^{-1}$ )	$q_s$ ( $\text{mm s}^{-1}$ )
	(m)						
Pasto	0,09	n	12	12	4	12	
		Mín	180	0,69	0,029	1,52	
		Máx	630	0,91	0,035	24,34	
		Média	393,75	0,80	0,032	7,00a	
	CV (%)	25,34	0,08	9,60	80,97		
	0,58	n	8	8	8	8	
		Mín	195	0,48	0,029	2,08	
		Máx	370	0,81	0,038	47,91	
Média		291,75	0,63	0,035	25,33b		
CV (%)	20,98	0,22	6,90	65,64			
Caatinga	0,09	n	12	12	4	12	
		Mín	270	0,65	0,028	2,51	
		Máx	1020	0,88	0,038	27,98	
		Média	461,67	0,79	0,033	13,12a	
	CV (%)	34,98	0,09	12,10	60,32		
	0,58	n	8	8	8	8	
		Mín	420	0,40	0,031	2,00	
		Máx	660	0,64	0,037	65,28	
Média		487,50	0,53	0,035	34,49b		
CV (%)	15,34	0,23	5,40	57,39			

n – tamanho da amostra; Mín – mínimo; Máx – máximo e CV – coeficiente de variação. Para uma determinada variável, médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente entre as áreas dentro de cada diâmetro da calha pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

O valor de  $t_e$  (s) foi menor nas áreas cobertas pelo pasto, variando de 180 a 630 s para as medidas com calhas de 0,09 m, e 195 a 370 s para as calhas de 0,58 m. O solo sob a vegetação nativa promoveu um atraso no tempo de início do escoamento superficial em ambos os tratamentos, o qual variou de 270-1020 e 420-660 s para as calhas de 0,09 e 0,58 m, respectivamente.

Na Caatinga, o maior intervalo de tempo para o início do escoamento superficial verificado nos dois tratamentos pode estar associado a fatores como a cobertura do solo e grau de compactação (SPOHR, 2007). Neste sentido, é possível presumir que a cobertura vegetal

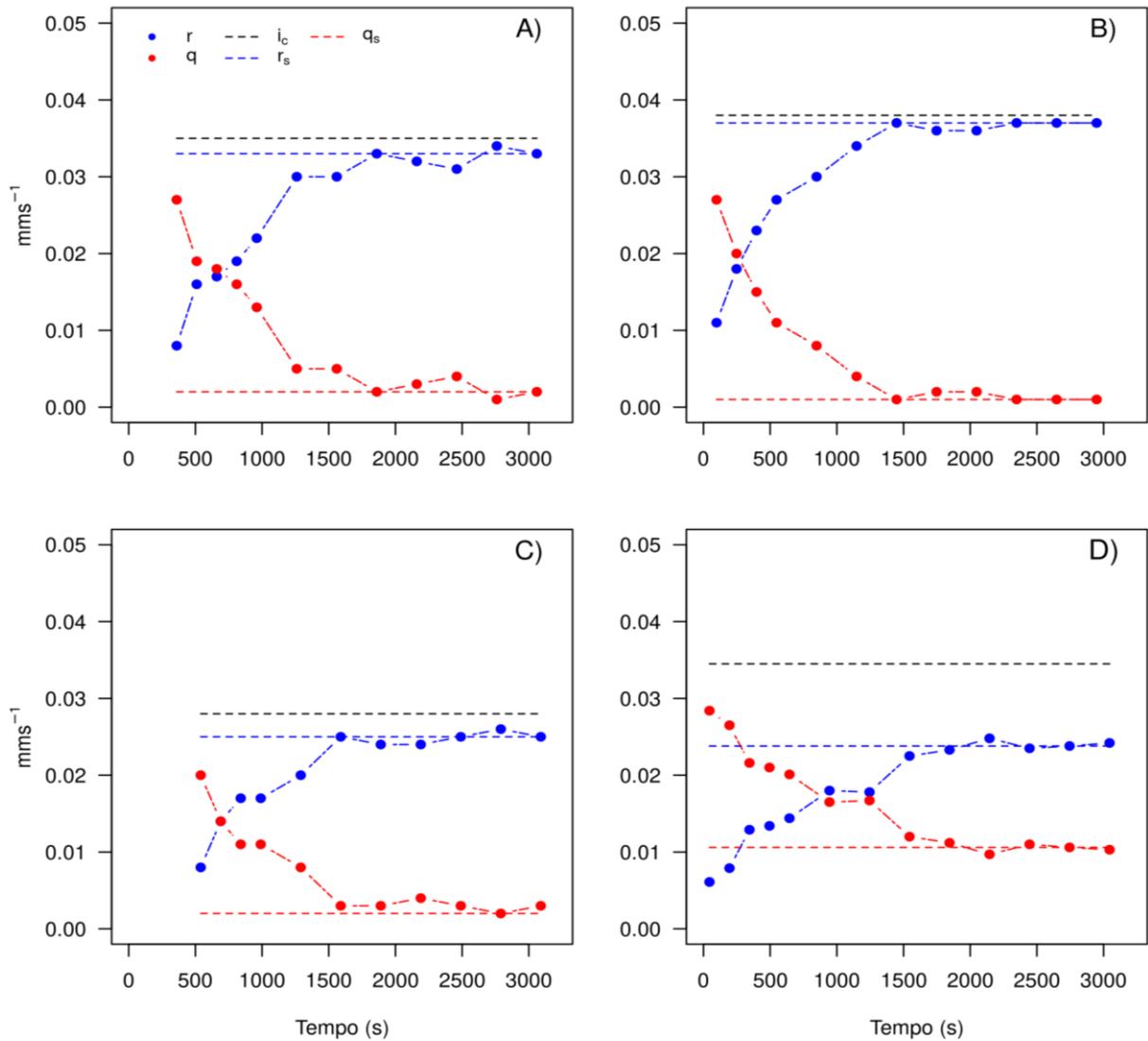
contribuiu para a diminuição do tempo para o escoamento superficial, e conseqüentemente para o aumento da taxa de infiltração de água no solo.

De acordo com Rocha Júnior et al. (2014) a retirada da vegetação nativa seguida da inserção de pastagem provoca alterações nas propriedades do solo que reduzem a velocidade de infiltração de água nesse meio. Além disso, quando associados às ações antrópicas, esses sistemas tendem a apresentar redução na porosidade causada pelo tráfego de máquinas e instrumentos agrícolas que criam uma camada compactada no perfil do solo, reduzindo a infiltração e tendo como efeito o aumento no tempo de início do escoamento.

Os coeficientes de escoamento foram determinados pela razão entre a taxa de escoamento superficial ( $\text{mm s}^{-1}$ ) e a intensidade de precipitação ( $\text{mm s}^{-1}$ ), e correspondem a porcentagem de chuva que escoou superficialmente. No pasto, para os experimentos realizados com as calhas de 0,09 m o coeficiente de escoamento variou de 0,69 a 0,91, enquanto que com o uso das calhas maiores, variou de 0,48 a 0,81. Na área da Caatinga, os valores obtidos sob o uso da calha de 0,09 m aproximaram-se aos da área de pasto aplicados ao mesmo tratamento, enquanto que nas maiores foram relativamente mais baixos, variando de 0,40 a 0,64, sugerindo uma melhor taxa de infiltração nesse ambiente quando comparado à área de pastagem.

As intensidades médias das chuvas,  $i_c$ , foram similares para os dois usos do solo e para os tratamentos utilizados. No pasto,  $i_c$  apresentou médias de 0,032 e 0,035  $\text{mm s}^{-1}$  para as calhas de 0,09 e 0,58 m de diâmetro, respectivamente. Na Caatinga, com o uso das calhas de 0,09 m,  $i_c$  foi de 0,033, e 0,035 para as calhas de 0,58 m. Apesar de uma maior densidade vegetal e altura das plantas presentes na área de mata nativa, que servem como barreira para o vento, não houve interferência sobre a precipitação gerada.

Em relação às taxas de infiltração experimental sob regime estacionário,  $q_s$ , estas foram alcançadas antes das três últimas execuções, sendo inicialmente estimadas considerando os três últimos pontos de dados das curvas de infiltrações. Alguns exemplos são exibidos na Figura 9.

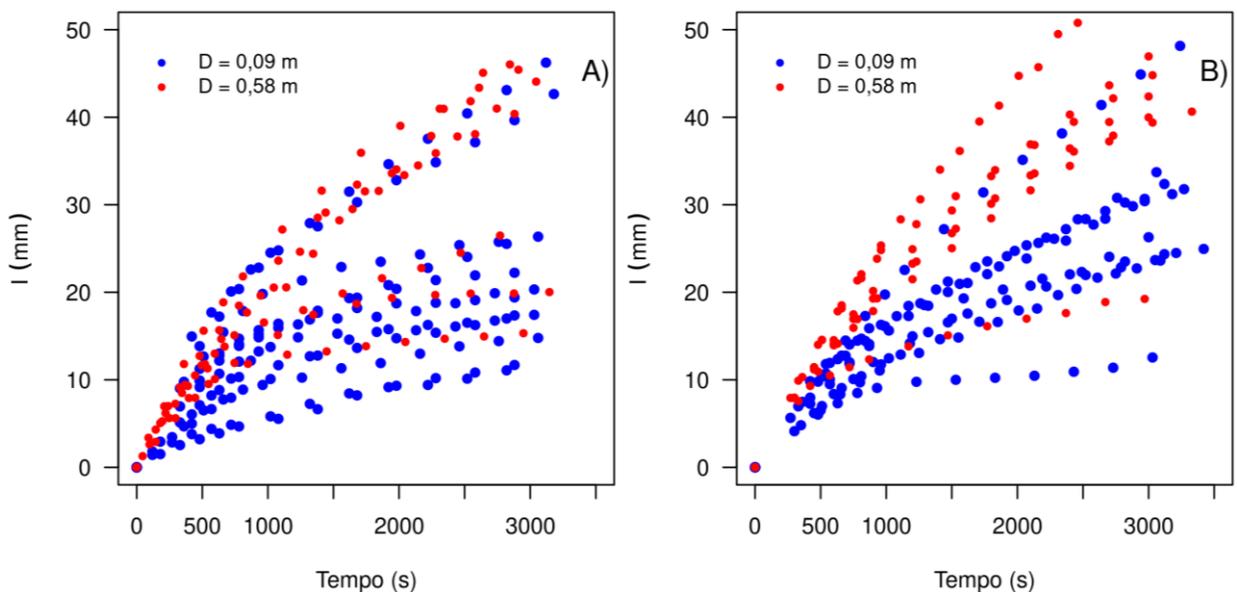


**Figura 9.** Exemplos ilustrativos de simulações de chuvas com duração de 50 minutos obtidas para: A) Solo de Caatinga com calha cilíndrica de 0,09 m de diâmetro; B) Solo de Caatinga com calha cilíndrica de 0,58 m de diâmetro; C) Solo de pasto com calha cilíndrica de 0,58 m de diâmetro e D) Solo de pasto com calha cilíndrica de 0,09 m de diâmetro. As curvas de infiltração,  $q$  ( $\text{mm s}^{-1}$ ), foram obtidas subtraindo as taxa de escoamentos,  $r$  ( $\text{mm s}^{-1}$ ), das intensidades de chuvas,  $i_c$  ( $\text{mm s}^{-1}$ ). As taxas de infiltração experimental sob regime estacionário,  $q_s$  ( $\text{mm s}^{-1}$ ), foram definidas considerando os últimos pontos da curva com  $Er < 2\%$ .

Os valores médios de  $q_s$  apresentaram diferenças significativas entre os tamanhos das calhas utilizadas, para os dois usos do solo. No pasto, o valor de  $q_s$  obtido com calhas de 0,58 m de diâmetro foi aproximadamente 3,6 vezes superior àquela com calhas de 0,09 m de diâmetro. Na Caatinga, esse valor teve aumento aproximado de 2,6 vezes (Tabela 2). Esse incremento de  $q_s$  observado com a utilização de calhas maiores, em ambas as áreas, pode estar relacionado a uma melhor captação das gotas de chuva simulada por parte destas, como

também, segundo Nunes et al. (2012), à sua maior abrangência sobre os caminhos preferenciais formados pelas raízes, os quais viabilizam o movimento de água no solo.

Sete medidas de infiltração por simulação de chuva com calhas cilíndricas de 0,09 m de diâmetro, sendo quatro na Caatinga e três no pasto, tiveram que ser descartadas por apresentarem taxas de escoamento que superaram as intensidades de chuvas aplicadas, reproduzindo valores não realistas de escoamento e conseqüentemente de infiltração. As outras 25 medidas de infiltração por simulação ( $D = 0,09$  m) exibiram formas usuais (Figura 10), com uma parte côncava correspondendo ao regime de fluxo transiente e uma parte linear, no final das curvas, relacionadas ao regime estacionário (DI PRIMA et al., 2016).



**Figura 10.** Curvas de infiltração acumulada em áreas de Caatinga (A) e pasto (B) obtidas por aspersão em calhas coletoras de escoamento superficial cilíndricas de 0,09 e 0,58 m de diâmetros.

Todas as medidas de infiltração por aspersão com calhas de 0,58 m de diâmetro tiveram êxito, oito em cada área, sem descartes de medidas. Dessa forma, puderam-se reproduzir curvas de infiltração acumulada compatíveis para aplicação do algoritmo BEST-steady, independentemente do diâmetro do infiltrômetro.

As curvas de infiltração nas áreas de Caatinga e pasto tiveram comportamentos distintos nas lâminas acumuladas para tempos de infiltração entre 50 e 60 minutos. De forma geral, houve uma diferença na infiltração acumulada do solo sob pasto em relação ao solo com Caatinga (Figura 10A e 10B), caracterizando a influência da pressão exercida por animais e máquinas agrícolas sobre a estrutura do solo. A maior cobertura vegetal da Caatinga

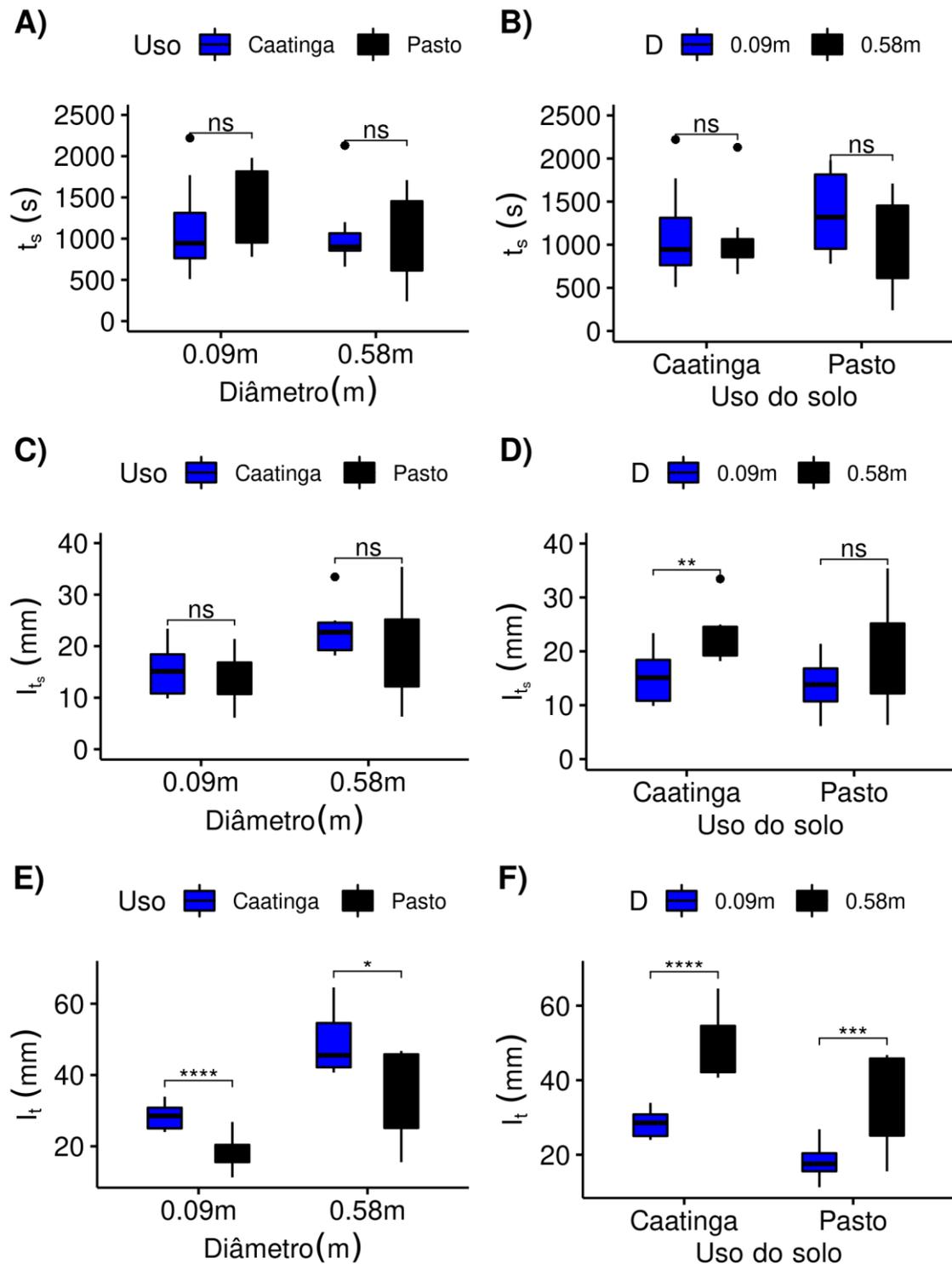
proporciona uma maior densidade e diversidade de raízes que favorece o processo de infiltração de água nos seus solos. As raízes das plantas quando decompostas, além melhorar a estruturação do solo, reproduzem canais que geram caminhos preferenciais para um maior fluxo de água nesse meio. (SALTON e TOMAZI, 2014).

Em um estudo de infiltração em Latossolo vermelho de textura argilosa submetido a diferentes usos do solo, constatou-se que os valores de velocidade de infiltração em área de Mata Nativa superaram o pasto e as demais áreas (ZWIRTES et al., 2011), comportamento semelhante ao obtido nessa investigação.

As medidas de infiltração por aspersão foram acompanhadas de alguns *outliers*, dos quais foram extraídas dez medidas consideradas extremas e com valores concomitantes de  $I_t$ ,  $S$  e  $K_s$ : quatro no pasto ( $D = 0,09m$ ), 5 na Caatinga ( $D = 0,09m$ ) e apenas um na Caatinga ( $D = 0,58m$ ).

De acordo com teste de normalidade de Shapiro-Wilk, os resíduos apresentaram distribuição normal ( $p > 0,05$ ) para a maioria das células avaliadas, exceto para  $t_s$  obtido com  $D = 0,58m$  na Caatinga,  $I_t$  com  $D = 0,58m$  no pasto e  $K_s$  com  $D = 0,09m$  no pasto. Aplicando o teste de Levene, não se constatou homogeneidade das variâncias nos diferentes grupos para os valores de  $S$  e  $K_s$  ( $p < 0,05$ ). Em seguida, executou-se a ANOVA bidirecional com os dados transformados e não transformados para verificar as diferenças significativas. Como os dois testes levarem às mesmas conclusões, optou-se por não transformar a variável de resultado e continuar com a ANOVA de dois fatores com os dados originais.

Os tempos de estabilização ( $t_s$ ) com ambas as calhas (0,09 e 0,58 m) variaram entre 1127-1076 s, para lâminas infiltradas ( $I(t_s)$ ) variaram entre 15-23 mm, na Caatinga, e entre 1359-1064 s, para lâminas entre e 14-19 mm, no pasto, respectivamente. Analisando os efeitos principais, os valores de  $t_s$  não diferiram entre os tipos de usos do solo, tampouco entre as medidas com as distintas calhas de escoamento (Figura 11A e B).

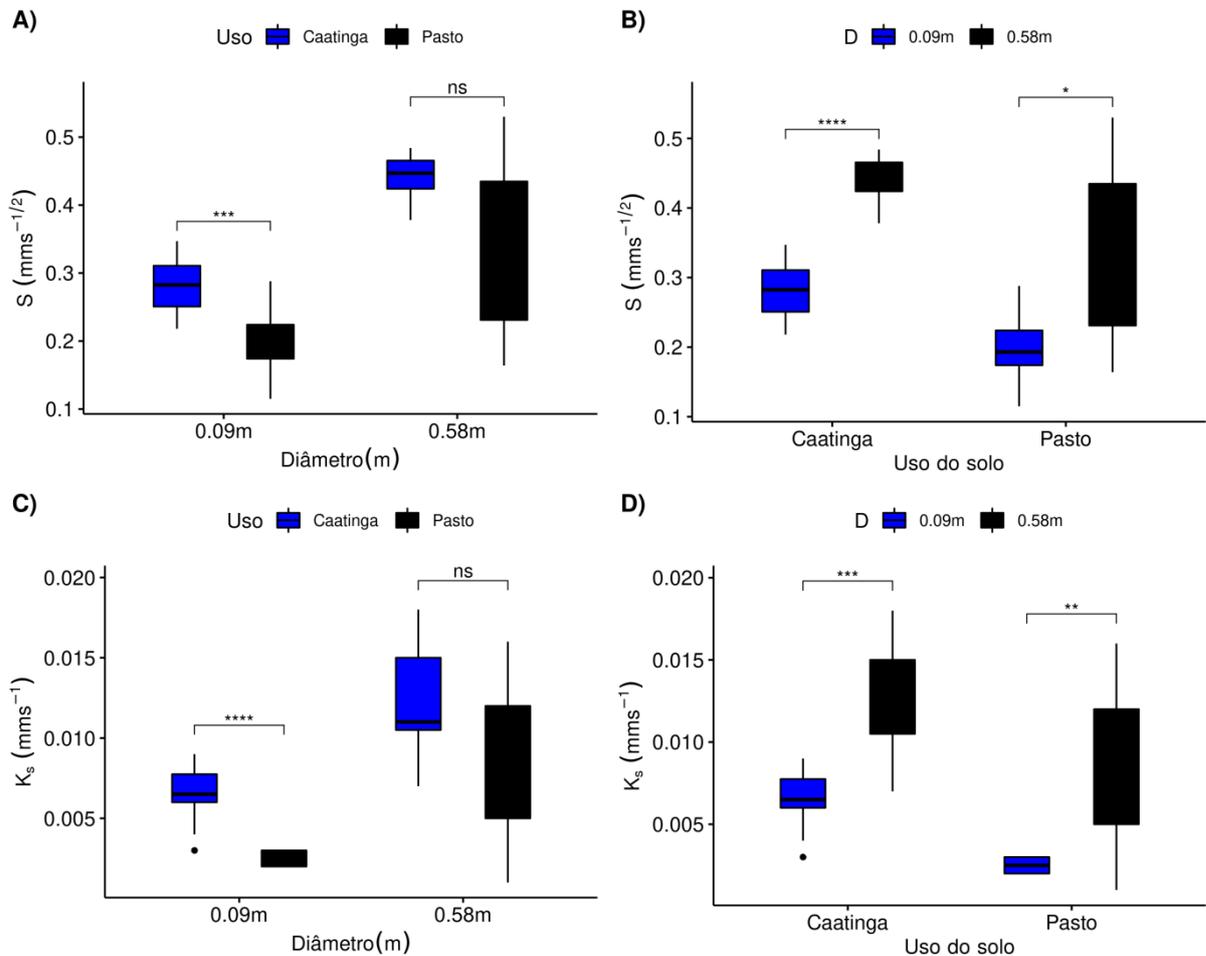


**Figura 11.** Valores do tempo de estabilização ( $t_s$ ), lâmina de infiltração no momento da estabilização ( $I_{ts}$ ) e lâmina de infiltração total ( $I_t$ ) para as medidas de infiltração por aspersão com dois diâmetros ( $D = 0,09$  e  $0,58m$ ), em solos de Caatinga e pasto. ns – não significativo; \* Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey; \*\* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste de Tukey; \*\*\* Significativo a 0,1% de probabilidade, pelo teste de Tukey; \*\*\*\* Significativo a 0% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

As lâminas acumuladas das infiltrações nos momentos de estabilização ( $I(t_s)$ ) não apresentaram diferença estatística entre as áreas para as duas dimensões de calhas utilizadas (Figura 11C). No entanto, foram diferentes entre as medidas com 0,09 e 0,58 m de diâmetros obtidas para o solo sob Caatinga, com lâminas médias de 15 e 23 mm, respectivamente (Figura 11D). Para intervalos entre 45-50 minutos, os valores das lâminas de infiltração total ( $I_t$ ) variaram entre 28-49 mm e 18-36 mm para os solos sob Caatinga e pasto, obtidas com as calhas de 0,09 e 0,58 m de diâmetros, respectivamente. Desse modo, foram constatadas diferenças significativas para os valores de  $I_t$ , tanto entre as áreas, quanto entre as calhas utilizadas para as medidas (Figura 11E e F).

Uma análise dos efeitos do uso do solo (Caatinga e pasto) e dos diâmetros ( $D = 0,09$  e  $0,58$  m) sobre os parâmetros hidrodinâmicos sorvidade ( $S$ ) e condutividade hidráulica ( $K_s$ ) foi realizada com significância estatística recebendo um ajuste de Bonferroni.

As variações médias das respostas de  $S$  e  $K_s$  em função dos diâmetros 0,09 e 0,58 m e das mudanças do uso do solo de Caatinga para pasto se encontram na Figura 12. Em análise, é possível verificar diferença nos valores de  $S$  e  $K_s$  entre todos os grupos, tanto entre as medidas com 0,09 e 0,58 m de diâmetros (Figura 12A e C) como entre a Caatinga e pasto (Figura 12B e D).



**Figura 12.** Valores de sorvidade (S) e condutividade hidráulica saturada (K<sub>s</sub>), determinados com medidas de infiltração por aspersão para dois diâmetros (D = 0,09 e 0,58m), em solos de pasto e Caatinga. ns não significativo; \* Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey; \*\* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste de Tukey; \*\*\* Significativo a 0,1% de probabilidade, pelo teste de Tukey; \*\*\*\* Significativo a 0% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

No pasto, os valores médios de S foram 0,194 e 0,328 mm s<sup>-1/2</sup>, e de K<sub>s</sub>, 0,003 e 0,009 mm s<sup>-1</sup>, para as medidas realizadas com as calhas de 0,09 e 0,58 m de diâmetros, respectivamente. Na Caatinga, para as respectivas calhas, os valores de S variaram entre 0,283 e 0,441 mm s<sup>-1/2</sup>, e entre 0,006 e 0,012 mm s<sup>-1</sup> para K<sub>s</sub>. Estes tiveram comportamento semelhante, não apresentando diferença estatística entre as áreas com o uso do diâmetro de 0,58 m (Figura 12A e C). Por outro lado, ambos foram significativamente diferentes entre as áreas com o uso da calha de menor diâmetro (Figura 12A e C).

Diversos elementos físico-hídricos atuam sobre a sorvidade e a condutividade hidráulica do solo, no entanto, segundo Lima et al. (2014), esses parâmetros são essencialmente dependentes da estrutura do solo. A sorvidade também é dependente do conteúdo de água inicial do solo.

Apesar de a densidade e porosidade não apresentarem diferenças significativas entre as áreas de pasto e Caatinga (Tabela 1), nota-se uma tendência a menores valores de densidade e maiores de porosidade para a mata nativa, o que pode ter contribuído para os resultados obtidos, uma vez que a condutividade hidráulica é altamente sensível a mudanças nas propriedades do solo e de acordo com Almeida et al. (2017), variações na porosidade podem acarretar alta variabilidade nesses parâmetros.

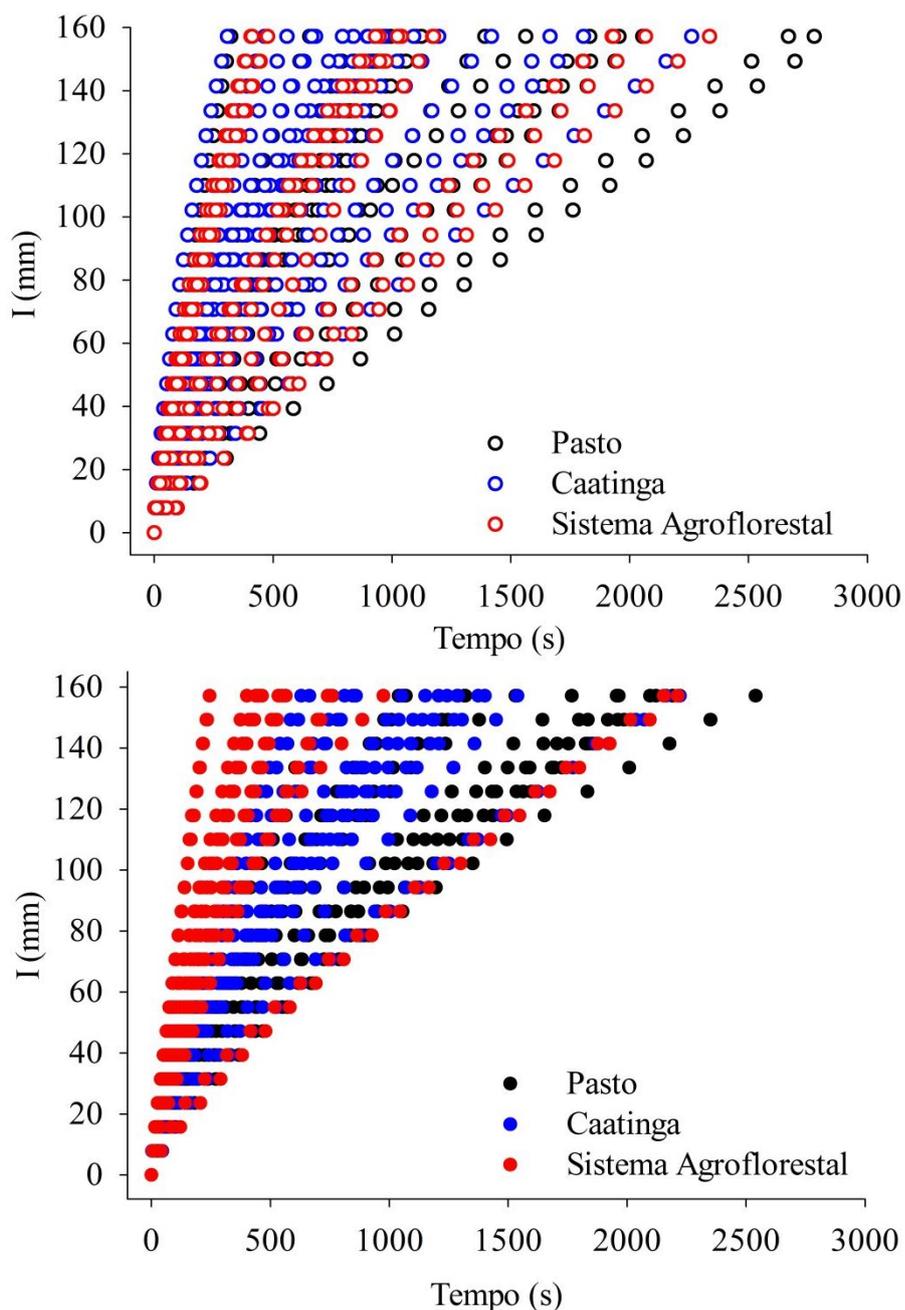
De Oliveira Júnior et al. (2014), em análise das propriedades hidrodinâmicas de um Neossolo Regolítico sob pastagem e Caatinga, também observaram maiores valores de  $S$  e  $K_s$  para a área de mata nativa, com valores médios, respectivamente, iguais a  $0,791 \text{ mm s}^{-1/2}$  e  $0,063 \text{ mm s}^{-1}$  para o solo sob pastagem, e  $0,939 \text{ mm s}^{-1/2}$  e  $0,125 \text{ mm s}^{-1}$  respectivamente para  $S$  e  $K_s$  do solo sob Caatinga. Os autores atribuíram os resultados, além da distribuição dos tamanhos de partículas, à densidade do solo nos dois usos, sendo esta maior no solo do pasto, corroborando com os obtidos neste estudo.

Com o uso da calha de 0,09 m de diâmetro, tanto a sorvidade, quanto a condutividade hidráulica apresentaram maiores valores médios para o solo sob a Caatinga que os obtidos no sistema pasto, com aumento em torno de 1,4 vezes em  $S$  e cerca de 2 vezes em  $K_s$ , diferenças que também podem ser atribuídas à diversidade de canais no solo produzidos pelas raízes das plantas, as quais geram caminhos preferências para o fluxo de infiltração, uma vez que todos os solos foram avaliados sob a mesma condição de umidade. Por outro lado, as não significâncias encontradas entre as áreas com o uso da calha de maior diâmetro, podem estar relacionadas à maior variabilidade dos dados encontrada mediante a utilização dessa calha.

Entre os diâmetros das calhas, os valores de  $S$  e  $K_s$  apresentaram diferenças significativas em ambos os sistemas de uso de solo. De modo geral, os maiores valores, tanto da sorvidade, como da condutividade hidráulica, foram observados para as calhas de maiores diâmetros ( $D=0,58 \text{ m}$ ). Na Caatinga, o valor médio da sorvidade obtido com o uso da calha de 0,58 m de diâmetro foi  $0,441 \text{ mm s}^{-1/2}$ , cerca de 1,5 vezes maior ao valor de  $0,283 \text{ mm s}^{-1/2}$ , obtido para a calha de 0,09 m. No pasto houve uma diferença ainda maior, com esse aumento de aproximadamente 1,7 vezes. Em relação à condutividade hidráulica, o valor médio estimado para a área de mata nativa com a calha maior foi de  $0,012 \text{ mm s}^{-1}$ , 2 vezes maior que o valor obtido para a calha menor. Assim como para  $S$ , na área de pasto  $K_s$  apresentou maior aumento, com valor médio de  $0,009 \text{ mm s}^{-1}$  para a calha de 0,58 m, 3 vezes superior que o obtido com a calha de 0,09 m.

### 3.2 EXPERIMENTOS COM INFILTRÔMETRO DE ANEL SIMPLES

A Figura 13 ilustra o comportamento das lâminas de infiltração tridimensional axissimétrica ( $I_{3D}$ ) obtidas com infiltrômetros de anel simples para as três áreas estudadas em função das alturas de aplicação de água,  $h_{inf}=0,03$  e  $h_{inf}=0,34$  m. Observa-se um maior tempo de infiltração para a área de pasto sob as duas alturas, quando comparada às demais áreas.



**Figura 13.** Curvas de infiltração das áreas de pasto, Caatinga e sistema agroflorestal para as medidas realizadas com aplicação de água sob  $h_{inf} = 0,03$  (A) e  $h_{inf} = 0,34$  m (B).

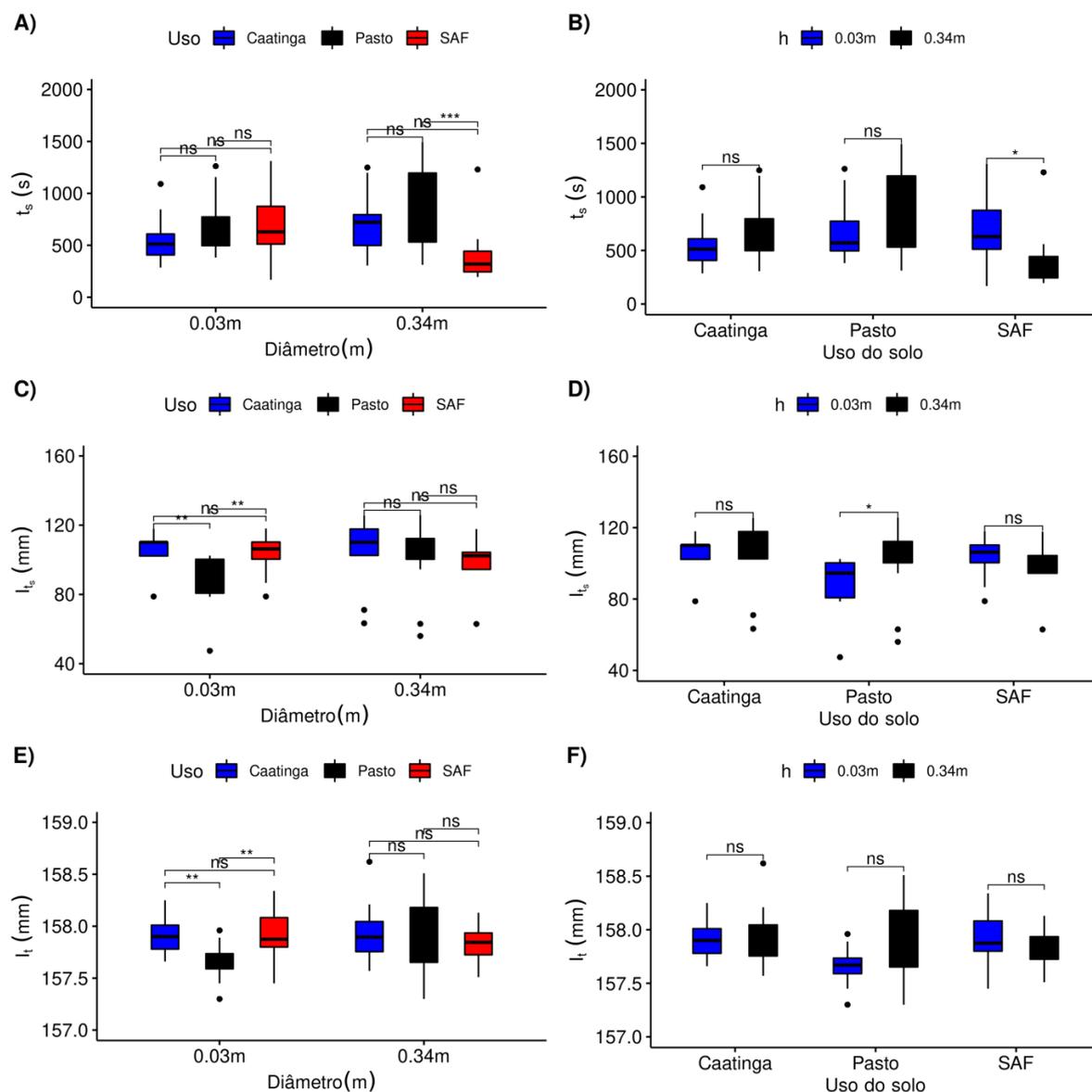
As maiores velocidades de infiltração de água no solo verificada para as áreas de Caatinga e SAF se dão, provavelmente, devido à presença de maior cobertura vegetal nesses ambientes, facilitando o processo de infiltração através dos caminhos preferenciais formados pelas raízes. Além disso, uma possível maior concentração de matéria orgânica também pode ter contribuído para a infiltração de água nesses solos, uma vez que esse composto atua como estabilizador de agregados, influenciando da distribuição dos poros (SALTON et al., 2008).

De acordo Silva Filho (2016), o tempo de uso e manejo inadequado do solo em zonas de pastos, leva a mudanças físicas do mesmo em decorrência da compactação pela pressão exercida por animais e maquinários sobre a superfície, que reduzem sua capacidade de infiltração de água.

Oliveira et al., 2015, ao efetuarem testes de infiltração em áreas de pasto e Caatinga, constataram alterações significativas nas propriedades do solo sob o pasto em relação ao solo com cobertura vegetal da Caatinga, essencialmente na densidade do solo, influenciando diretamente na diminuição da capacidade de infiltração de água nesse meio. Moreira et al., 2017, também realizaram medidas de infiltração sob o uso de infiltrômetro de anel para sistemas de pasto e agrofloresta, observando, assim como nesse estudo, uma redução da velocidade de infiltração na área utilizada por pastejo.

Para  $h_{inf} = 0,34$  m é observada uma maior taxa de infiltração no SAF em relação aos outros sistemas analisados, enquanto que para  $h_{inf} = 0,03$  m, na qual apresentou uma maior distinção no comportamento das curvas, a maior taxa foi verificada para o solo da área de Caatinga. As durações mais curtas verificadas para as áreas de Caatinga e SAF, podem estar atreladas, de acordo com Nunes et al. (2012) à presença de uma maior cobertura vegetal, por efeito das raízes que atuam como caminhos presenciais permitindo uma melhor condição de infiltração de água no solo.

O tempo de estabilização ( $t_s$ ), lâmina de infiltração no momento da estabilização ( $I_t$ ) e lâmina de infiltração total ( $I_T$ ), para os diferentes usos do solo e alturas de aplicação de água ( $h_{inf}$ ), são apresentados na Figura 14.



**Figura 14.** Valores do tempo de estabilização ( $t_s$ ), lâmina de infiltração no momento da estabilização ( $I_{ts}$ ) e lâmina de infiltração total ( $I_t$ ) para as medidas de infiltração realizadas com infiltrômetro de anel simples em solos de Caatinga, pasto e SAF, com aplicação de água sob altura de  $h_{inf}=0,03$  e  $h_{inf}=0,34$  m. ns não significativo; \* Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey; \*\* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste de Tukey; \*\*\* Significativo a 0,1% de probabilidade, pelo teste de Tukey; \*\*\*\* Significativo a 0% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Nas áreas de Caatinga, pasto e SAF, não houve diferença entre os valores médios do  $t_s$  obtidos com a aplicação de água a 0,03 m de altura (Figura 14A). No entanto, para a altura de 0,34 m, os valores de  $t_s$  diferiram entre as áreas de pasto e SAF. Apesar dessa diferença, para ambas as alturas de água vertidas, o solo sob pasto promoveu um atraso no tempo de estabilização, este com maiores valores médios, de 645 e 891 segundos para as alturas de 0,03 e 0,34 m, respectivamente, seguidos das áreas de Caatinga e SAF. Resultados estes já

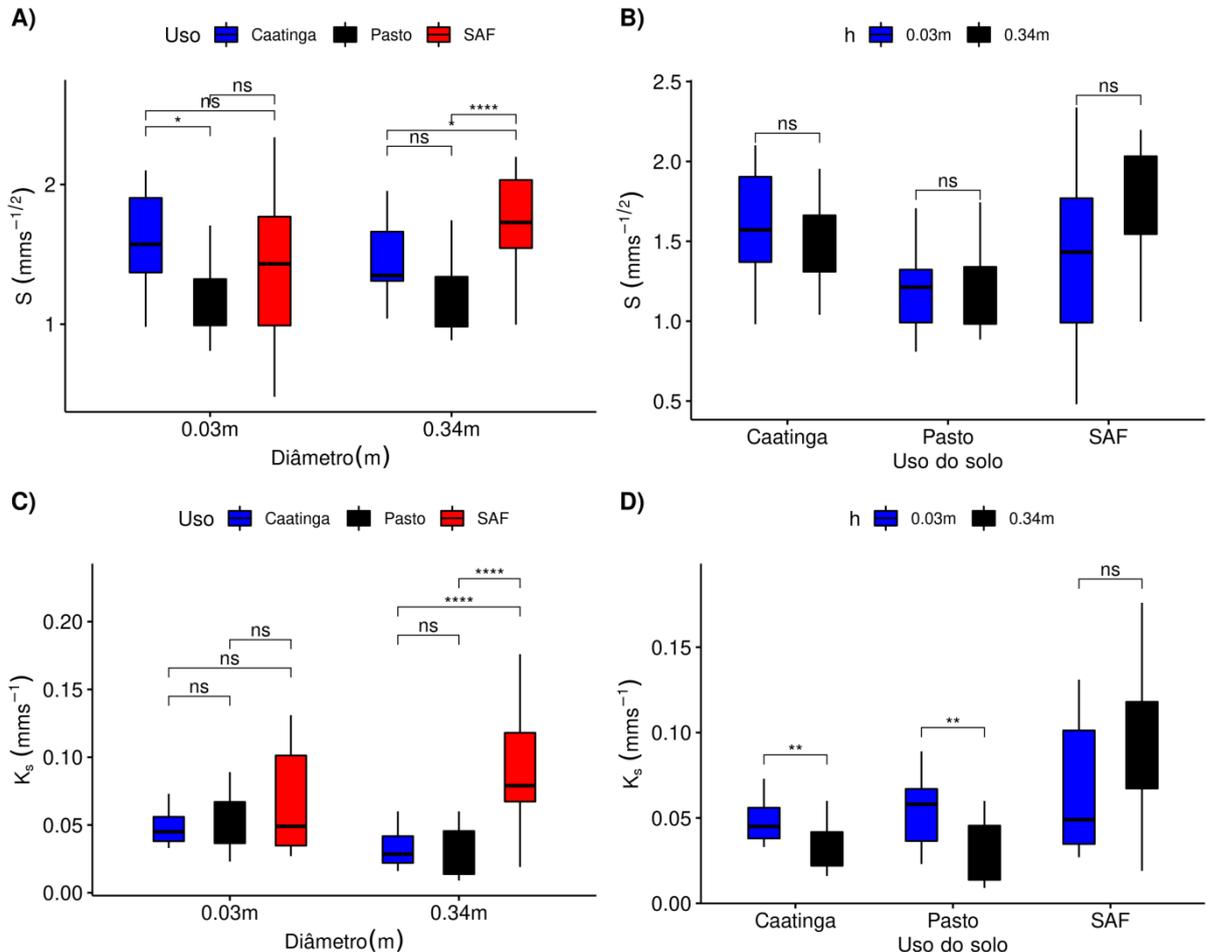
esperados, uma vez que solos mais compactados, como os do pasto, promovem a redução da infiltrabilidade e consequentemente o aumento de  $t_s$ .

Entre as alturas de aplicação de água no infiltrômetro, não houve diferença significativa dos valores médios de  $t_s$  para os usos do solo, exceto para o SAF. No entanto, maiores valores são constatados para a altura de 0,34 m nas três áreas analisadas. Esse aumento no tempo de estabilização está associado ao selamento da camada superficial do solo, promovido pela maior energia de impacto das gotas com o aumento da altura de aplicação de água, reduzindo assim, o potencial de infiltração.

Em relação às lâminas de infiltração no momento da estabilização, estas não apresentaram diferenças estatísticas entre as áreas sob o uso da altura de derramamento de água de 0,34 m. Por outro lado, a aplicação de água sob menor altura (0,03 m) gerou comportamento distinto sobre as lâminas, em que os valores médios tanto da Caatinga como do SAF diferiram do valor médio de  $I_t$  constatado para a área de pasto. Diferença esta que pode estar associada a uma maior variabilidade constatada para o pasto em relação aos outros usos. Todavia, para as três áreas analisadas sob as duas alturas, os valores encontrados foram próximos, variando entre 89-107 mm.

A avaliação de  $I_t$  entre as alturas de aplicação de água no infiltrômetro (Figura 14D) demonstrou diferença significativa apenas para a área de pasto, em que o valor médio foi de 89 mm para o ensaio de infiltração sob altura de derramamento de água de 0,03 m, e 102 mm para o obtido com altura de 0,34 m, podendo também ser justificado devido à variação verificada com a diminuição da altura.

A Figura 15 apresenta a variação média de  $S$  e  $K_s$  em função dos usos do solo e das alturas de aplicação de água no infiltrômetro de anel simples.



**Figura 15.** Valores de sorvidade (S) e condutividade hidráulica saturada (K<sub>s</sub>) determinados com medidas realizadas com infiltrômetro de anel simples em solos de Caatinga, pasto e SAF, com aplicação de água sob altura de  $h_{\text{inf}} = 0,03$  e  $h_{\text{inf}} = 0,34$  m. ns não significativo; \* Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey; \*\* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste de Tukey; \*\*\* Significativo a 0,1% de probabilidade, pelo teste de Tukey; \*\*\*\* Significativo a 0% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Entre os usos, a sorvidade apresentou diferença nos valores médios verificados entre a Caatinga e o pasto sob a altura de 0,03 m. O solo sob a vegetação da Caatinga proporcionou um aumento de S, com valor médio de  $1,582 \text{ mm s}^{-1/2}$ , enquanto que no pasto esse valor foi de  $1,262 \text{ mm s}^{-1/2}$ , 1,2 vezes menor. O valor de S obtido para o SAF não diferiu dos obtidos para as demais áreas, no entanto, este apresentou maior valor médio, com S igual a  $1,728 \text{ mm s}^{-1/2}$ . Para a altura de 0,34 m, o comportamento de S foi contrário, onde o solo sob o Sistema Agroflorestal apresentou diferença, em termos de valores de médios, entre os demais usos. No entanto, assim como para a altura 0,03 m, o SAF apresentou maior valor de S, seguido da Caatinga e do pasto, com médias de  $1,728$ ,  $1,409$  e  $1,194 \text{ mm s}^{-1/2}$ , respectivamente.

Para a altura de aplicação de água de 0,03 m, a mudança no uso do solo não interferiu na condutividade hidráulica, não apresentando, portanto, diferenças entre os valores médios obtidos para as três áreas. Em contrapartida, para a altura de 0,34 m,  $K_s$  apresentou comportamento semelhante a  $S$  obtido com a mesma altura, diferindo significativamente entre a área do SAF com as áreas de Caatinga e pasto. Arelado a isso, maiores valores de  $K_s$  também foram verificados para o SAF em relação às demais áreas sob o uso das duas alturas. Nesse sistema, para  $h_{inf}=0,03$  m, o valor médio  $K_s$  foi igual  $0,090 \text{ mm s}^{-1}$ , cerca de 1,8 vezes maior ao obtido para a Caatinga e 1,4 vezes maior ao do Pasto, e para  $h_{inf}=0,34$  m, esse valor foi  $0,077 \text{ mm s}^{-1}$ , aproximadamente 2,3 e 2,6 vezes maior que os verificados para as áreas de Caatinga e pasto, respectivamente.

Entre as alturas de aplicação de água no infiltrômetro, os valores médios de  $S$  não apresentaram diferenças nas três áreas estudadas, no entanto, é possível observar, para todos os usos, um incremento da sorvidade quando obtida vertendo água com altura mais próxima à superfície do solo ( $h_{inf}=0,03$  m). Para esse mesmo grupo, os valores médios de  $K_s$  foram significativamente diferentes nas áreas de Caatinga e pasto, e assim como para a sorvidade, a condutividade hidráulica aumentou com o emprego da menor altura, em todos os usos do solo.

Na Tabela 3, encontram-se os dados estatísticos de condutividade hidráulica saturada do solo,  $K_s$ , para os experimentos realizados com a metodologia *Beerkan* nas áreas de pasto, Caatinga e SAF sob as duas alturas de aplicação de água ( $h_{inf}$ ).

**Tabela 3.** Estatística descritiva da condutividade hidráulica saturada,  $K_s$  ( $\text{mm h}^{-1}$ ) obtida a partir de medidas de infiltração com o Beerkan e sob duas alturas de aplicação de água ( $h_{inf}$ ), em áreas de pasto, Caatinga e SAF.

		$K_s$		$K_s$		$K_s$	
<b>Pasto</b>	$\theta_s$ ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )	0,41a	0,47b	0,50b	0,53c	0,42a	0,48b
	$h_{inf}$ (m)	0,03	0,34	0,03	0,34	0,03	0,34
	n	15	15	15	15	14	15
	Mín	0,023	0,009	0,029	0,016	0,019	0,027
	Máx	0,201	0,060	0,117	0,060	0,266	0,176
	Média	0,064ab	0,029a	0,050ab	0,033a	0,090b	0,077b
	CV (%)	66,96	62,72	45,47	43,03	76,75	56,06

$\theta_s$  – umidade de saturação; n – tamanho da amostra; Mín – mínimo; Máx – máximo e CV – coeficiente de variação. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem significativamente entre as áreas dentro de cada altura de aplicação de água pelo teste de Tukey ( $p<0,05$ ).

Os valores médios de  $K_s$  não apresentaram diferenças significativas entre as alturas de água aplicadas para todos os usos do solo. No entanto, é possível constatar que para todas as áreas, os valores de  $K_s$  aumentaram com a redução de ( $h_{inf}= 0,03$  m), sobretudo para a área de

pasto, cujo valor foi aproximadamente 2,2 vezes maior quando comparado com o obtido para  $h_{inf} = 0,34$  m. Estes resultados estão associados, de acordo com Bagarello et al. (2014a) e Alagna et al. (2016), à maior energia da água sobre a superfície com o aumento na altura de aplicação, acarretando a desagregação das partículas do solo e a compactação da sua camada superficial, promovendo desta forma, uma diminuição dos macroporos, e tendo como consequência a redução da condutividade hidráulica.

Todavia, para a área do SAF foi verificada diferença estatística na condutividade hidráulica obtida sob o uso da maior altura de aplicação de água, em relação aos valores obtidos para as demais áreas sob a mesma altura, em que o valor médio foi superior cerca de 2,6 vezes maior que o do pasto, e 2,3 vezes maior que o da Caatinga.

Devido a condutividade hidráulica do solo saturado ser dependente essencialmente da geometria e continuidade dos poros, esta propriedade varia expressivamente de um solo para outro, como também para o mesmo solo, em razão das mudanças estruturais, apresentando, em determinados pontos, valores extremos (GONÇALVES e LIBARDI, 2013; SANTOS et al., 2012).

### 3.3 INFILTRÔMETRO DE ASPERSÃO *versus* BEERKAN

Tendo em vista que, tanto as medidas realizadas com o infiltrômetro aspersor como as efetuadas com o anel simples sob a maior altura de aplicação de água ( $h_{inf}=0,34$  m), provocaram modificação na superfície do solo (Figura 16), fatores como impacto das gotas de chuva simulada na superfície e altura utilizada para o derramamento da água tiveram ações semelhantes sobre as propriedades estimadas. Permitindo dessa maneira, a atribuição de uma ligação física entre essas metodologias.



**Figura 16.** Superfície do solo sob Caatinga após experimentos de infiltração a anel simples, conduzidos em alturas de 0,03 m (a) e 0,34 m (b) de despejo de água.

Apesar dessas condições de similaridade, o método *Beerkan* quando comparado ao infiltrômetro aspersor, possui maiores vantagens em termos de eficiência e custo, o qual é de mais simples e mais rápida execução, demanda de poucos materiais e conseqüentemente mais fácil de ser realizado em áreas maiores, uma vez que o conteúdo de água e as ferramentas necessárias para sua condução são mínimas.

Os valores de Sorvidade ( $S$ ) e condutividade hidráulica ( $K_s$ ) estimados a partir de experimentos com o infiltrômetro de aspersão e de anel simples para os três usos, estão dispostos na Tabela 4. Entre os dois métodos, é possível verificar diferenças estatísticas de  $S$  para as três áreas, em que os valores obtidos com o infiltrômetro de anel para ambas as alturas de aplicação de água, foram significativamente mais elevados que os obtidos com o infiltrômetro aspersor com a utilização dos diferentes tamanhos de calhas. Por outro lado, de modo geral, os experimentos realizados vertendo água no infiltrômetro de anel sob  $h_{inf}=0,03$  m, geraram valores mais altos de  $S$  e  $K_s$  em relação, tanto ao infiltrômetro aspersor, como ao de anel sob  $h_{inf}=0,34$  m. Além disso, os valores médios de  $K_s$  estimados por aspersão sob os dois diâmetros de calhas, foram semelhantes aos obtidos com o anel simples com  $h_{inf}=0,34$  m, nas áreas de pasto e Caatinga.

**Tabela 4.** Valores de Sorvidade, S ( $\text{mm s}^{-1/2}$ ) e condutividade hidráulica Saturada, Ks ( $\text{mm s}^{-1}$ ), determinados com o BEST-steady para medidas com infiltrômetros de aspersão e de anel simples (*Beerkan*), em áreas de pasto, Caatinga e SAF.

Pasto	Estatística	S ( $\text{mm s}^{-1/2}$ )	K <sub>s</sub> ( $\text{mm s}^{-1}$ )
Infiltrômetro de aspersão (D=0,09 m)	n	10	10
	Média	0,194a	0,003a
	CV (%)	27,14	21,08
Infiltrômetro de aspersão (D=0,58 m)	n	8	8
	Média	0,328b	0,009ab
	CV (%)	40,83	63,49
<i>Beerkan</i> (h <sub>inf</sub> =0,03 m)	n	15	15
	Média	1,262c	0,064cd
	CV (%)	31,21	66,96
<i>Beerkan</i> (h <sub>inf</sub> =0,34 m)	n	15	15
	Média	1,194c	0,029ac
	CV (%)	23,39	62,72
Caatinga			
Infiltrômetro de aspersão (D=0,09 m)	n	10	10
	Média	0,283b	0,006a
	CV (%)	15,04	28,72
Infiltrômetro de aspersão (D=0,58 m)	n	7	7
	Média	0,441d	0,012a
	CV (%)	8,69	31,46
<i>Beerkan</i> (h <sub>inf</sub> =0,03 m)	n	15	15
	Média	1,582c	0,050bcd
	CV (%)	32,47	45,47
<i>Beerkan</i> (h <sub>inf</sub> =0,34 m)	n	15	15
	Média	1,409c	0,033ace
	CV (%)	18,20	43,03
SAF			
<i>Beerkan</i> (h <sub>inf</sub> =0,03 m)	n	14	14
	Média	1,728c	0,090d
	CV (%)	28,92	76,75
<i>Beerkan</i> (h <sub>inf</sub> =0,34 m)	n	15	15
	Média	1,572c	0,077de
	CV (%)	33,08	56,06

D – diâmetro da calha; h<sub>inf</sub> - altura de aplicação de água; n – tamanho da amostra; Mín – mínimo; Máx – máximo e CV – coeficiente de variação. Para uma determinada variável, médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente entre as áreas dentro de cada diâmetro da calha altura de aplicação de água pelo teste de Tukey (p<0,05).

Dessa forma, como o infiltrômetro de anel simples combinado à maior altura de aplicação de água proporciona resultados aproximados aos obtidos com o infiltrômetro aspersor, e atrelado à sua maior viabilidade operacional e econômica, esse método apresenta-se como um instrumento bastante favorável à caracterização hidrodinâmica de solos sob chuvas intensas.

#### 4 REFERÊNCIAS

- ALAGNA, V., BAGARELLO, V., DI PRIMA, S., GIORDANO, G., & IOVINO, M. Testing infiltration run effects on the estimated water transmission properties of a sandy-loam soil. **Geoderma**, 267, 24–33. 2016.
- ALMEIDA, K. S. S. A.; SOUZA, L. S.; PAZ, V. P. S.; SILVA, F. T. S.; PEREIRA, J. S. L. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado em Latossolo Amarelo distrocoeso, no município de Cruz das Almas. **Irriga**, Botucatu, v. 22, n. 1, p. 259-274, 2017.
- BAGARELLO, V., CASTELLINI, M., DI PRIMA, S., & IOVINO, M. Soil hydraulic properties determined by infiltration experiments and different Heights of water pouring. **Geoderma**, 213, 492–501. 2014a.
- BAGARELLO, V., Di Prima, S., Iovino, M. Comparing alternative algorithms to analyze the Beerkan infiltration experiment. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, n. 3, p. 724-736. 2014b.
- BARBOSA, Jânio dos Santos et al. Atributos físico-hídricos de um Cambissolo Húmico sob sistema agroflorestal no planalto catarinense. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.
- BRADY, Nyle C. **Natureza e propriedades dos solos**. F. Bastos, 1989.
- BROOKS, R. ; COREY, T. HYDRAU uc propriedades de meios porosos. **Hydrology Papers, Colorado State University** , v. 24, p. 37, 1964.
- CENTENO, Luana Nunes et al. Textura do solo: Conceitos e aplicações em solos arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 4, n. 1, p. 31-37, 2017.
- DE OLIVEIRA JÚNIOR, José AS et al. Variabilidade espacial de propriedades hidrodinâmicas de um Neossolo Regolítico sob pastagem e caatinga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 631-639, 2014.
- DI PRIMA, Simone et al. Testing a new automated single ring infiltrometer for Beerkan infiltration experiments. **Geoderma**, v. 262, p. 20-34, 2016.
- DOS SANTOS, Daniella Pereira et al. Variabilidade Espacial De Atributos Físicos Do Solo Em Vale Aluvial Na Região De Pernambuco. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 1, p. 2271, 2018.
- DREWRY, JJ Recuperação natural de propriedades físicas do solo a partir de danos causados por pisadas em solos pastoris na Nova Zelândia e Austrália: uma revisão. **Agricultura, Ecossistemas e Meio Ambiente** , v. 114, n. 2-4, pág. 159-169, 2006.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro, 212p. 1997.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA- Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), 306p. 2006.

GONÇALVES, Adriano Dicesar Martins de Araújo; LIBARDI, Paulo Leonel. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1174-1184, 2013.

GONDIM, J. E. F.; REBOUÇAS, C. A. M.; PORTELA, J. C.; CAVALCANTI, J. S. J.; SILVA, S. Y. A. M.; DIAS, M. C. C. Resistência mecânica do solo à penetração em diferentes manejos do solo e da caatinga em Governador Dix-Sept Rosado-RN. **Revista Agropecuária Científica no Semiárido**, Campina Grande, v. 11, n. 2, p. 72-76, 2015.

HAVERKAMP, R. et al. Análise tridimensional da infiltração do infiltrômetro de disco: 2. Equação de infiltração com base física. **Pesquisa de Recursos Hídricos**, v. 30, n. 11, pág. 2931-2935, 1994.

HUDSON, Norman Webster. **The flour pellet method for measuring the size of raindrops**. Department of Conservation and Extension, 1964.

KASSAMBARA, A. **Practical Statistics in R for Comparing Groups: Numerical Variables**, Independently Published, 204p. 2019.

LASSABATERE, L., ANGULO-JARAMILLO, R., SORIA UGALDE, J.M., CUENCA, R., BRAUD, I., HAVERKAMP, R., Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters through infiltration experiments—BEST. **Soil Science Society of American Journal**, v.70, p.521-532, 2006.

LEMOES, R.C.; SANTOS, R.D. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 2.ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Embrapa-SNLCS, 46p. 1984.

LIMA, J.R. DE S.; SOUZA, E.S. DE; ANTONINO, A.C.D.; SILVA, I. DE F. DA; CORRÊA, M.M.; LIRA, C.A.B. DE O. Atributos físico-hídricos de um Latossolo Amarelo cultivado e sob mata nativa no Brejo Paraibano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.9, n.4, p.599-605, 2014.

MEYER, L. D.; HARMON, W. C. Multiple-intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. **Transactions of the ASAE**, v. 22, n. 1, p. 100-0103, 1979.

MOREIRA, Wendel et al. Velocidade de infiltração básica da água no solo em diferentes agroecossistemas amazônicos. **Agrarian Academy**, v. 4, n. 07, 2017.

NUNES, J.A. S.; SILVEIRA, M. H.D.; SILVA, T. J.A.; NUNES, P. C. M.; CARVALHO, K. S. Velocidade de infiltração pelo método do infiltrômetro de anéis concêntricos em Latossolo Vermelho de cerrado. **Enciclopédia Biosfera**, v.8, n.15; p. 1685, 2012.

OLIVEIRA, G. G.; OLIVEIRA, G. C.; SILVA, E. A.; CARDUCCI, C. E.; BARBOSA, S. M.; SILVA, B. M. Indicadores de qualidade física para Argissolos sob pastagens nas regiões leste e sul de Minas Gerais. **Revista Ciências Agrárias**, v. 58, n. 4, p. 388-395, 2015.

PENNER, Giovanni Chaves et al. Avaliação da condutividade hidráulica na zona não saturada do solo na bacia hidrográfica do igarapé sapucajuba (Belém-Pa). **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 7, p. 8954-8964, 2019.

PINHEIRO, Rinaldo JB; NUMMER, Andrea Valli; RAUBER, Ana Carla. Determinação da Condutividade Hidráulica das Principais Unidades Geológico-Geotécnicas de Santa Maria-RS. **Geociências (São Paulo)**, v. 36, n. 2, p. 347-363, 2017.

REICHARDT, Klaus. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. Campinas: Fundação Cargill, 1985.

REYNOLDS, W. D. Saturated hydraulic conductivity: field measurement. **Soil sampling and methods of analysis**, 1993.

ROCHA JÚNIOR, J. P. et al. Can soil organic carbon pools indicate the degradation levels of pastures in the Atlantic forest biome. **Journal Agricultural Science**, v. 6, p. 84-95, 2014.

ROSSI, Celeste Queiroz et al. Atributos químicos e físicos de solo cultivado com oleráceas em microbacia hidrográfica, após desastre ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1764-1775, 2015.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 11-21, 2008.

SALTON, J. C.; TOMAZI, M. Sistema radicular de plantas e qualidade do solo. **Embrapa Agropecuária Oeste-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 2014.

SANTOS, Karla S. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 828-835, 2012.

SHAPIRO, Samuel Sanford; WILK, Martin B. Um teste de análise de variância para normalidade (amostras completas). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, pág. 591-611, 1965.

SILVA FILHO, E. P. da. Velocidade de infiltração em área pastagem degradada e floresta natural no município de Porto Velho (RO). **Revista franco-brasileira de geografia-Confins**, n. 29, 2016.

SOUZA, Eduardo Soares de et al. Variabilidade espacial dos parâmetros hidrodinâmicos de duas parcelas agrícolas no estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1795-1804, 2008.

SPOHR, R. B. **Influência das características físicas do solo nas perdas de água por escoamento superficial no sul do Brasil e Uruguai**. Tese (Doutorado em Engenharia de Água e Solo) – Programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2007, 105p.

TEAM, R. Core et al. R: Uma linguagem e ambiente para computação estatística. 2013

TEIXEIRA, Paulo César et al. Manual de métodos de análise de solo. **Brasília: Embrapa**, p. 573, 2017.

TUCCI, Carlos EM. Água no meio urbano. **Livro água doce**, p. 1-40, 1997.

WEID, Jean Marc Von Der. Alimentando o mundo no século XXI. **Revista Agriculturas**, Brasil, v. 9, n. 1, p. 8-11, 2012.

YILMAZ, Deniz et al. Hydrodynamic characterization of basic oxygen furnace slag through an adapted BEST method. **Vadose Zone Journal**, v. 9, n. 1, p. 107-116, 2010.

ZWIRTES, A. L.; SPOHR R. B.; BARONIO C. A.; ROHR M. R.; MENEGOL D. R. Caracterização físico-hídrica de solos submetidos a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava, v.4, n.3, p.51-58, 2011.

## **CAPÍTULO 3 – AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICO-HÍDRICA DE SOLOS SOB SISTEMAS DE PASTAGEM, CAATINGA E AGROFLORESTA**

### **1 INTRODUÇÃO**

O acelerado processo de crescimento populacional nas últimas décadas tem provocado o aumento na demanda por alimentos (SAATH e FACHINELLO, 2018) e o consequente uso insustentável dos recursos naturais, sobretudo dos solos, o que tem contribuído para a alteração da qualidade desses sistemas (ALEXANDER et al., 2015).

No semiárido brasileiro, o excessivo uso do solo e a remoção da vegetação nativa ocasionam a degradação dos recursos ambientais. A conversão da Caatinga em terras agrícolas e pastagens muitas vezes levam à redução da capacidade produtiva dos solos (LAL, 1996). O intenso pisoteio de animais em áreas de pastagem causa a compactação do solo (SATTLER et al., 2018), favorecendo, dessa maneira, o aumento da densidade do solo e a diminuição da infiltração de água nas camadas mais superficiais, comprometendo a dinâmica da água nesse meio (DE OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2014).

As alterações promovidas pela mudança no uso da terra podem gerar variações nos seus atributos físico-hídricos, interferindo na movimentação e retenção de água no solo, uma vez que tais parâmetros são intensamente afetados pelos sistemas de uso e manejo. Neste sentido, segundo Engel (1999), os sistemas agroflorestais (SAFs) tem se apresentado como uma importante alternativa para a redução dos impactos causados ao solo pelo manejo insustentável.

Os sistemas agroflorestais, ou agroflorestas, consistem em uma forma de uso do solo de maneira ambientalmente correta, a partir de consórcios de culturas agrícolas com espécies arbóreas (DOS SANTOS POMPEU et al., 2011). De acordo com Xavier et al. (2012) a utilização desses sistemas permite a melhoria das condições físicas, químicas e biológicas do

solo, podendo, dessa maneira, ser implementada para a restauração de florestas e recuperação de áreas degradadas.

Para avaliar a qualidade física do solo, diversos indicadores são propostos na literatura, dentre eles, a densidade do solo ( $\rho_s$ ), condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ), capacidade de aeração (CA), macroporosidade ( $P_{mac}$ ) e capacidade de campo relativa ( $CC_r$ ). Além desses atributos, a curva de retenção de água é um indicador que tem sido bastante utilizado em estudos da qualidade do solo, visto que, a partir dela, é possível obter a caracterização das propriedades hidráulicas do solo (LUCAS et al., 2011).

Atrelado a esses fatores, a determinação das propriedades hidráulicas do solo é fundamental para a compreensão de diversos processos hidrológicos e de estudos do movimento de água no solo (VILLARREAL et al., 2019).

Ensaio para a obtenção das propriedades hidrodinâmicas do solo podem ser executados a partir de métodos diretos e indiretos, em campo ou laboratório, no entanto, essas aplicações são comumente dispendiosas e requerem um longo tempo para a realização (SOUZA et al., 2008). Em vista disso, alguns pesquisadores desenvolveram metodologias mais simplificadas, a exemplo do método BEST (*Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters*), o qual propõe, a partir de medidas de infiltração em anel, a determinação dos parâmetros das curvas de retenção de água no solo e de condutividade hidráulica, considerando a textura e estrutura do solo, e sendo baseado em dados prontamente disponíveis, práticos e de baixo custo (HAVERKAMP et al., 1994; LASSABATÈRE et al., 2006; DI PRIMA et al., 2016).

O conhecimento de fatores que interferem as propriedades hidráulicas estimadas com determinado método de anel, é imprescindível para a aplicação de análises experimentais adequadas em termos do uso requerido de dados (REYNOLDS et al., 2000). Conforme estudos recentes a respeito do BEST, a altura a partir da qual é realizada a aplicação de água na superfície do solo, pode influenciar fortemente as medidas de infiltração, de forma a produzir valores substancialmente distintos à medida que essa altura é modificada (ALAGNA et al., 2016; BAGARELLO et al., 2014).

Sendo assim, objetiva-se nesse capítulo, avaliar a influência de diferentes usos do solo nas propriedades físicas e hidrodinâmicas de um Cambissolo Háptico no sertão de Pernambuco, em análise dos parâmetros das curvas de retenção,  $\theta(h)$ , e de condutividade hidráulica,  $K(\theta)$ , obtidas a partir de experimentos de infiltração em anéis sob diferentes alturas de aplicação de água no solo, em áreas de pasto, Caatinga e sistema agroflorestral.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido no município de Serra Talhada, no campus da Universidade Federal Rural de Pernambuco, localizado na Microrregião do Vale do Pajeú, nos domínios da bacia hidrográfica do Rio Pajeú, a qual está inserida, em sua totalidade, no estado de Pernambuco, entre as coordenadas geográficas de 07°16' 20" e 08°56' 01" de latitude Sul e 36°59' 00" e 38° 57' 45" de longitude a Oeste de Greenwich. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo BShw', semiárido, quente e seco, com chuvas de verão-outono entre os meses de janeiro e maio, média de precipitação pluvial anual de aproximadamente 647 mm ano<sup>-1</sup> e média térmica do ar correspondente a 25°C.

Foram selecionadas três áreas, uma de pasto cultivado com capim-corrente (*Urochloa mosambicensis*) e orelha de onça (*Macroptilium martii*), uma com cobertura vegetal de Caatinga com predominância de espécies vegetais de estrutura arbóreo-arbustiva e a terceira um sistema agroflorestal (SAF) composto por culturas agrícolas em consórcio com espécies arbóreas, entre elas, a palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill), Leucena (*Leucaena leucocephala*), mamona (*Ricinus communis*) e Angico (*Anadenanthera colubrina*). A área de pastagem tinha um histórico de uso há 20 anos. Os solos das áreas são classificados, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, como Cambissolos Háplicos Ta Eutróficos Típicos (EMBRAPA, 2006).

### 2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DO SOLO

Para a determinação da curva granulométrica e conseqüente classificação textural, foram coletadas, para cada área, oito amostras de solo deformadas dos 20 cm superiores do solo. Após a coleta, as amostras foram levadas ao laboratório para a realização das análises de granulometria, pelo método do densímetro para as frações mais finas (argila e silte), e peneiramento mecânico a seco para as frações mais grosseiras (areia), após o pré-tratamento para a dispersão do solo, com solução de hexametáfosfato de sódio e agitação mecânica (TEIXEIRA et al., 2017).

Nas áreas, também foram coletadas amostras de solos adjacentes à ensaios de infiltração com anel simples para a determinação da densidade do solo e das umidades inicial  $\theta_0$  e final  $\theta_s$ .

### 2.3 ENSAIOS COM INFILTRÔMETRO DE ANEL SIMPLES

Os ensaios de infiltração efetuados com infiltrômetros de anel simples foram realizadas com o procedimento proposto por Bagarello et al., (2014) e Alagna et al., (2016). Um anel de 0,085 m de diâmetro inserido a uma profundidade de 0,01 m foi utilizado para as avaliações seguindo o pressuposto da metodologia *Beerkan* (LASSABATÉRE et al., 2006; SOUZA et al., 2008).

Um total de 32 medidas de infiltração foi executado de maneira aleatória nas áreas de estudo. Para cada ensaio de infiltração foram vertidos sucessivamente de 15 a 20 volumes de água, cada um com 50 cm<sup>3</sup>, na superfície confinada do anel, e anotado o tempo que os volumes constantes de água levaram para infiltrar até o fluxo atingir o regime permanente (*steady state*).

As medidas de infiltração foram realizadas aplicando-se água sob duas condições de altura do fornecimento de água ( $h_{inf}$ ), dissipando a energia com os dedos das mãos para minimizar a perturbação causada pelo impacto da água sobre o solo (REYNOLDS, 1993). Em dezesseis ensaios de infiltração a água foi vertida a  $h_{inf} = 0,03$  m, e nos outros dezesseis vertida a  $h_{inf} = 0,34$  m, de modo a estabelecer uma comparação entre as medidas realizadas com os infiltrômetros de anel simples e de aspersão, caracterizadas, respectivamente, pela energia potencial gravitacional e energia cinética.

Nos locais de testes procedeu-se a limpeza da superfície do solo, deixando-o desprotegido de vegetação, de modo a maximizar os efeitos das gotas de água. Para assegurar a verticalidade da água vertida no anel e evitar o efeito do vento, um tubo transparente foi utilizado para as medidas com  $h_{inf} = 0,34$  m.

### 2.4 BEST – ALGORITMO E ANÁLISE DE DADOS

Nesta pesquisa, para a descrição dos parâmetros das curvas de retenção,  $\theta(h)$ , e de condutividade hidráulica,  $K(\theta)$ , fez-se o uso dos modelos de van Genuchten (1980):

$$\theta(h) = (\theta_s - \theta_r) \cdot \left[1 + \left(\frac{h}{h_g}\right)^n\right]^{-m} + \theta_r \quad \text{com} \quad m = 1 - \frac{2}{n} \quad (\text{BURDINE, 1953}) \quad (1)$$

e de Brooks & Corey (1964):

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^\eta \quad \text{com} \quad \eta = \frac{2}{mn} + 2 + p \quad (\text{BURDINE, 1953}) \quad (2)$$

sendo  $\theta$  a umidade volumétrica [ $L^3 L^{-3}$ ];  $\theta_r$  e  $\theta_s$  as umidades volumétricas residual e saturada [ $L^3 L^{-3}$ ], respectivamente;  $h$  o potencial matricial [ $L$ ];  $h_g$  [ $L$ ] um valor de escala de  $h$ ;  $m$  e  $n$  são parâmetros de forma;  $K_s$  a condutividade hidráulica saturada do solo [ $L T^{-1}$ ] e  $\eta$  o parâmetro de forma da curva de condutividade hidráulica e  $p$  é um fator de tortuosidade definido igual a 1 quando a relação entre  $n$  e  $m$  é descrita pelo modelo de Burdine (1953).

Essas funções possuem cinco parâmetros desconhecidos, sendo dois de forma ( $m$  ou  $n$  e  $\eta$ ) e três de normalização ( $\theta_s$ ,  $K_s$  e  $h_g$ ), os quais foram obtidos através do programa BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments) proposto por Lassabatère et al. (2006) e ajustados ao algoritmo alternativo BEST-steady, visto que estudos anteriores demonstraram uma maior adequação deste modelo para a análise de infiltração sob diferentes alturas de aplicação de água no solo.

Os parâmetros de forma, que estão associados à textura, foram estimados a partir da granulometria e da densidade do solo, assumindo uma similaridade entre a distribuição granulométrica e a curva de retenção de água no solo. O parâmetro de normalização  $\theta_s$  foi determinado a partir da umidade gravimétrica saturada e da massa específica do solo, enquanto que os demais parâmetros de normalização,  $K_s$  e  $h_g$ , estimados através do modelo de infiltração tridimensional (HAVERKAMP et al., 1994) ajustados aos dados medidos de infiltração acumulada em regime transitório.

Após a definição de  $\theta_s$  e  $K_s$ , o parâmetro de escala da curva de retenção de água,  $h_g$ , é determinado pela equação (LASSABATÈRE et al., 2006):

$$h_g = \frac{-S^2}{c_p(\theta_s - \theta_0) \left[1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s}\right)\right] K_s} \quad (3)$$

onde  $S$  ( $mm s^{-1/2}$ ) é a sorvidade do solo e  $c_p$  é um parâmetro que depende apenas dos parâmetros de formas  $n$ ,  $m$  e  $\eta$  dos modelos de Condappa et al. (2002) e Lassabatère et al. (2006), conforme a equação:

$$c_p = \Gamma \left( 1 + \frac{1}{n} \right). \quad (4)$$

em que  $\Gamma$  é a função gama clássica.

A curva de retenção de água no solo estimada pelo BEST-steady foi aplicada para a determinação de três indicadores de qualidade física do solo, sendo eles, a macroporosidade ( $P_{mac}$ ), capacidade de aeração (CA) e a capacidade de campo relativa ( $CC_r$ ):

$$P_{mac} = \theta_s - \theta_{10} \quad (5)$$

$$CA = \theta_s - \theta_{100} \quad (6)$$

$$CC_r = \frac{\theta_{100}}{\theta_s} \quad (7)$$

onde  $\theta_{10}$  e  $\theta_{100}$  correspondem ao conteúdo volumétrico de água equivalente a  $h=-10$  e  $-100$  cm, indicando o volume de poros menores que 0,3 mm de diâmetro e a capacidade de campo, respectivamente (REYNOLDS et al., 2009).

## 2.5 PROCEDIMENTO ESTATÍSTICO

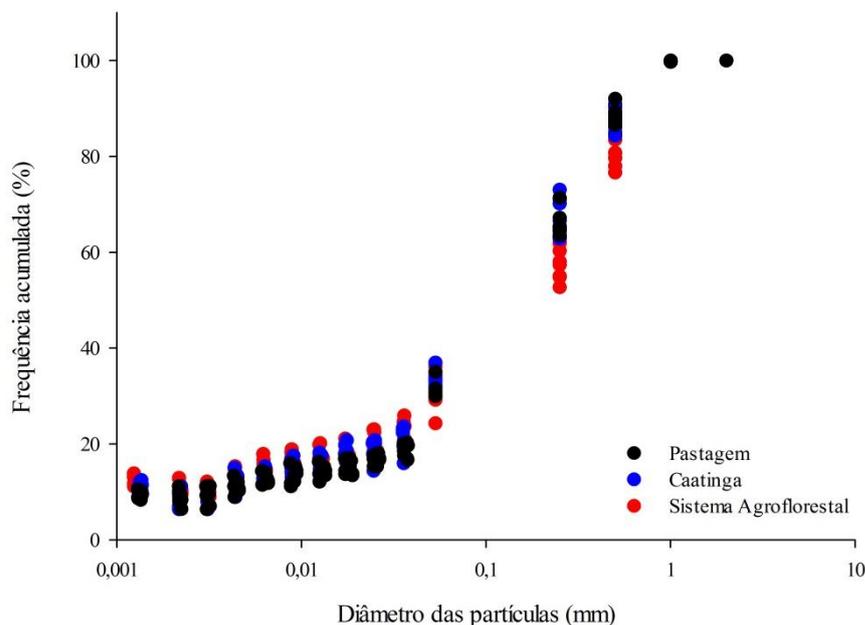
Para cada variável estudada, um conjunto de dados foi analisado utilizando a estatística descritiva (média, desvio padrão e coeficiente de variação). Todas as análises estatísticas foram conduzidas usando o software estatístico R 3.0.0 (TEAM, 2013). Os dados foram analisados para normalidade de distribuição pelo teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO E WILK, 1965) e homogeneidade de variância pelo teste Levene (KASSAMBARA, 2019). Satisfeitas as premissas, realizou-se a Análise de Variância ANOVA (two-way), seguida do pós-teste de Tukey HSD para a comparação das médias.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas referentes à distribuição granulométrica das amostras de solo coletadas nas áreas de pasto, Caatinga e sistema agroflorestal são apresentadas na Figura 1. Dentre as representações das curvas, constata-se um comportamento semelhante em todos os pontos, para todas as três áreas, sendo as classes texturais destas, enquadradas como franco-arenosas.

A textura refere-se à proporção das frações granulométricas de areia, silte e argila que compõem determinada massa de solo. Apesar de não sofrer alterações pelo sistema de manejo, ela é uma propriedade que exerce grande influência sobre outras características, como a densidade, porosidade e condutividade hidráulica saturada, sendo o seu estudo de fundamental importância para auxiliar a compreensão da dinâmica da infiltração de água no solo (CHERUBIN et al., 2016; SILVA et al., 2020).

Os valores de densidade do solo variaram entre 1,37, 1,31 e 1,32 g cm<sup>-3</sup> nas camadas de 0-10 cm e entre 1,47, 1,34 e 1,46 g cm<sup>-3</sup> nas camadas de 10-20 no pasto, Caatinga e sistema agroflorestal, respectivamente.



**Figura 1.** Curvas granulométricas das amostras de solo das áreas de pasto, Caatinga e sistema agroflorestal.

Na Tabela 1 encontram-se os parâmetros utilizados para o ajuste das curvas de retenção de água, realizados segundo modelo proposto por van Genuchten (1980). Os valores médios obtidos para os parâmetros de forma m e n, foram ligeiramente próximos para as três

condições de uso da terra e alturas de aplicação da água. Esses resultados são esperados, uma vez que estes parâmetros são dependentes da composição granulométrica do solo, não havendo diferença textural entre os solos analisados.

Ahmady et al. (2019) em estudo dos parâmetros da curva de retenção para solos de texturas franca e arenosa, encontraram valores médios para  $m$  e  $n$  de 0,089 e 2,196, respectivamente, semelhantes aos obtidos nesta pesquisa, sobretudo para as áreas de Caatinga e SAF.

Os parâmetros  $h_g$  e  $\theta_s$  foram mais sensíveis à variação da altura de derramamento da água na área de pastagem, com aumento significativo em  $h_g$  após a mudança de 0,03 para 0,34 metros. Os resultados verificados para o parâmetro  $h_g$  são similares aos obtidos por Castellini et al. (2021), onde constatam, com o aumento da altura de despejo de água, maiores valores de  $h_g$  para o solo com condições físicas inferiores.

**Tabela 1.** Estatística dos parâmetros da curva de retenção de água no solo, ou seja, teor de água do solo saturado,  $\theta_s$ ,  $n$ ,  $m$  e parâmetro de escala,  $h_g$ , obtido com o BEST-steady, sob duas alturas de derramamento de água ( $h_{inf}$ ).

Parâmetros/Unidades	Média	DP	CV(%)	Média	DP	CV(%)
Altura de aplicação da água	$h_{inf} = 0,03 \text{ m}$			$h_{inf} = 0,34 \text{ m}$		
	<b>Pasto</b>					
$\theta_s$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	0,407	0,021	5,14	0,47	0,051	10,85
$n(-)$	2,233	0,007	0,313	2,225	0,025	1,12
$m(-)$	0,104	0,003	2,884	0,101	0,010	9,90
$h_g$ (mm)	40,24	10,47	26,02	74,92	39,34	52,51
	<b>Caatinga</b>					
$\theta_s$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	0,497	0,058	11,67	0,532	0,017	3,19
$n(-)$	2,193	0,009	0,410	2,208	0,013	0,59
$m(-)$	0,088	0,004	4,54	0,094	0,005	5,32
$h_g$ (mm)	58,34	18,55	31,80	70,79	22,49	31,77
	<b>SAF</b>					
$\theta_s$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	0,425	0,027	6,35	0,482	0,043	8,92
$n(-)$	2,191	0,015	0,68	2,185	0,009	0,411
$m(-)$	0,087	0,006	6,89	0,05	0,004	4,70
$h_g$ (mm)	55,75	25,34	45,45	43,51	24,14	55,49

DP-Desvio Padrão; CV-Coeficiente de Variação;  $h_{inf}$  - Altura de aplicação de água durante os testes de infiltração (0,03 e 0,34 m); SAF-Sistema agroflorestal.

As curvas de retenção expressam a relação entre o conteúdo de água presente em cada ponto estudado no solo e a força com que ela está retida pelo mesmo (MELO FILHO et al.,

2015), esta denominada potencial matricial. São dependentes essencialmente das propriedades inerentes de cada solo, como a textura, estrutura, composição mineralógica e matéria orgânica, associadas às suas inter-relações (MELO et al., 2018; BEUTLER et al., 2002).

Na Figura 2 estão apresentadas as curvas de retenção de água no solo para as áreas de pastagem, caatinga e SAF, estimadas para as duas condições de altura de água (0,03 e 0,34 m). Nela é possível perceber pequenas diferenças entre as curvas. Para a menor altura de aplicação de água, 0,03 metros, verificou-se valores relativamente mais baixos de retenção de água no solo nas áreas de pastagem e SAF, enquanto uma maior retenção para a área de Caatinga. As curvas de retenção médias das três áreas, praticamente se sobrepuseram quando obtidas com  $h_{inf} = 0,34$  m (Figura 2B).

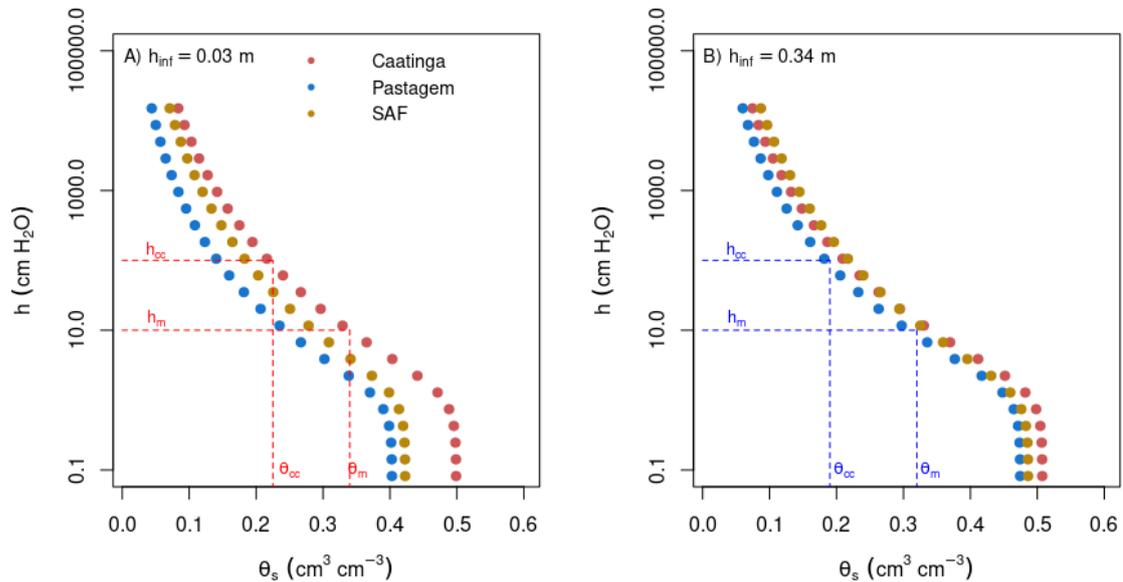
A melhor capacidade de absorção de água conferida para o solo da Caatinga (Figura 2A) pode estar relacionada a um possível maior teor de matéria orgânica presente nesse ambiente de vegetação nativa, onde, de acordo com Santos e Pereira (2013), o incremento desse composto no solo contribui para uma maior agregação e estabilidade dos seus agregados, aumentando sua porosidade e conseqüentemente a retenção de água no meio.

A estrutura do solo influencia diretamente na relação entre a umidade retida e a energia (BRADY e WEIL, 2013). Solos submetidos à compactação possuem menor capacidade de retenção de água quando comparados aos solos bem estruturados, devido ao aumento na sua densidade e à redução da sua porosidade promovida pela pressão contínua exercida sobre os mesmos. Nesse sentido, ainda de acordo com Brady e Weil (2013), quanto maior a porosidade total de um solo, maior a quantidade de água armazenável no perfil, corroborando com os resultados encontrados.

Os diferentes sistemas de manejo inadequados associados à mudança no uso da terra, da vegetação natural para, geralmente culturas agrícolas e pastagens, podem impactar na qualidade dos atributos do solo, interferindo na dinâmica de água devido alterações na sua estrutura (BRUIJNZEEL, 2004; ROCHA et al., 2016). Tal afirmativa pode ser observada em análise das curvas de retenção (Figura 2A), em que a conversão da área de caatinga em pastagem resultou na redução no volume de macroporos do solo, comprometendo a movimentação de água nesse sistema.

Situação semelhante foi constatada por Nicodemo et al., (2018), que ao avaliarem a qualidade física em solos sob sistemas agroflorestais, pastagem e mata nativa, observaram que o solo sob mata apresentou melhores condições físicas que o solo das demais áreas. O solo sob o sistema silviagrícola demonstrou propriedades físicas intermediárias, enquanto que na

área de pastagem houve uma diminuição na porosidade do solo, tendo como um dos motivos a influência do pisoteio animal nessa região.



**Figura 2.** Curvas de retenção das áreas de pastagem, caatinga e sistema agroflorestal, obtidas pelo método *Beerkan* com alturas de aplicação de água durante a infiltração  $h_{inf} = 0,03$  e  $h_{inf} = 0,34$  m.

Os indicadores da qualidade física do solo (Figura 3) demonstraram que a  $\rho_s$  foi maior na PA, seguida do SAF e CA para as duas alturas de aplicação de água. Segundo Moreira et al. (2014) solos submetidos a intenso uso agrícola tendem a apresentar aumento nos valores de densidade do solo, em decorrência da sua compactação.

Resultados semelhantes foram encontrados por Pott et al. (2017) ao avaliarem a qualidade física de solos em sistemas florestais, pecuários e integrados de produção em Latossolos, no qual identificaram para o pasto maiores valores de densidade do solo e menores para as áreas de regeneração com espécies nativas.

Os valores de  $K_s$  obtidos não apresentaram diferença significativa entre as três áreas para  $h_{inf}=0,03$  m, no entanto, maiores valores de  $K_s$  foram constatados para o SAF sob  $h_{inf}=0,34$  m, demonstrando melhores condições de movimentação de água no perfil desse solo. O aumento nos valores de  $K_s$  para esse sistema com a aplicação da altura de infiltração elevada, apresentou correlação positiva com o volume de macroporos observado para esse mesmo tratamento (Figura 3C), evidenciando a viabilidade dos sistemas agroflorestais para o fornecimento de melhores condições do solo (BARBOSA et al., 2017).

Por outro lado, esses resultados podem estar associados à alta variabilidade apresentada pela condutividade hidráulica, tanto para solos de mesma classe textural ou diferentes, como para solos sob mesmas condições de uso do solo ou usos distintos.

De modo geral, a macroporosidade ( $P_{mac}$ ) e a capacidade de aeração (CA) tiveram seus pontos dentro do ideal com maiores valores para PA. Os maiores valores de macroporosidade e capacidade de aeração na área de pastagem em relação às demais, podem estar relacionados ao sistema radicular das gramíneas presentes na área, o qual contribui para a melhoria na estruturação do solo, proporcionando uma boa agregação das suas partículas e consequentemente uma boa aeração (SALTON e TOMAZI, 2014).

Esses resultados corroboram com o estudo dos teores de carbono orgânico total e atributos físicos do solo de pastagem, floresta e agricultura, realizado por Coutinho et al. (2017), em que constataram maiores valores de macroporosidade para a área de pastagem em relação às demais áreas. O fator considerado pelos autores para justificar os resultados, também se relaciona à ação positiva das raízes de gramíneas cultivadas sobre os agregados do solo no pasto.

De acordo com Reynolds et al. (2007) a capacidade de campo relativa corresponde ao balanço ideal entre a capacidade de água na saturação e a capacidade de aeração do solo na zona rizosférica, sendo considerado um parâmetro fundamental para a caracterização hidráulica em solos. Ela é considerada ótima quando os valores médios situam-se entre 0,6 e 0,7. Quando os valores médios de  $CC_r$  são inferiores a 0,6, considera-se que o solo apresenta baixo conteúdo de água, e quando esses valores são superiores a 0,7, o solo detém baixo conteúdo de ar (REYNOLDS et al., 2007; OLNESS et al., 1998).

A capacidade de campo relativa ( $CC_r$ ) foi menor na PA e ficou no geral com maior quantidade de pontos dentro do ideal para CA seguida do SAF (Figura 3E). Neste contexto, no solo sob pastagem, quando aplicada a menor altura de derramamento de água, apresentou uma provável insuficiência de água no solo, o que pode ser explicado devido a uma maior quantidade de macroporos nessa condição de uso do solo em relação às demais (Figura 3C), permitindo uma boa drenagem e aeração, porém uma baixa umidade.



#### 4 REFERÊNCIAS

- AHMADY, T.; DELBARI, M.; AFRASIAB, P. Estimativa da Curva das Propriedades Hidráulicas do Solo através de Algoritmos do Experimento de Infiltração Beerkan. **JWSS-Isfahan University of Technology**, v. 23, n. 2, pág. 157-171, 2019.
- ALAGNA, V. et al. Testing infiltration run effects on the estimated water transmission properties of a sandy-loam soil. **Geoderma**, v. 267, p. 24-33, 2016.
- ALEXANDER, Peter et al. Drivers for global agricultural land use change: The nexus of diet, population, yield and bioenergy. **Global Environmental Change**, v. 35, p. 138-147, 2015.
- BAGARELLO, Vincenzo et al. Soil hydraulic properties determined by infiltration experiments and different heights of water pouring. **Geoderma**, v. 213, p. 492-501, 2014.
- BARBOSA, Jânio dos Santos et al. Atributos físico-hídricos de um Cambissolo Húmico sob sistema agroflorestral no planalto catarinense. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SOUZA, Z.M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C.G. Retenção de água em dois tipos de Latossolo sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, p.829- 834, 2002.
- BRADY, N.; WEIL, R. R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. **Bookman**. Porto Alegre, 3 ed., p. 686. 2013.
- BROOKS, R.; COREY, T. HYDRAU uc propriedades de meios porosos. **Hydrology Papers, Colorado State University**, v. 24, p. 37, 1964.
- BRUIJNZEEL, Leendert Adriaan. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees?. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 104, n. 1, p. 185-228, 2004.
- BURDINE, Net. Relative permeability calculations from pore size distribution data. **Journal of Petroleum Technology**, v. 5, n. 03, p. 71-78, 1953.
- CASTELLINI, Mirko et al. Improved Beerkan run methodology to assess water impact effects on infiltration and hydraulic properties of a loam soil under conventional-and no-tillage. **Soil Science Society of America Journal**, v. 85, n. 2, p. 235-248, 2021.
- CHERUBIN, M. R et al. A Soil Management Assessment Framework (SMAF) evaluation of Brazilian sugarcane expansion on soil quality. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, p. 215–226, 2016.
- CONDAPPA, D. de et al. Méthode Beerkan: caractérisation des propriétés hydrodynamiques des sols non saturés: rapport interne Hydrologie de la Zone Non Saturés–LTHE (p. 82). **Grenoble: Université de Grenoble**, 2002.
- DE OLIVEIRA JÚNIOR, José AS et al. Variabilidade espacial de propriedades hidrodinâmicas de um Neossolo Regolítico sob pastagem e caatinga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 631-639, 2014.

DI PRIMA, Simone et al. Testing a new automated single ring infiltrometer for Beerkan infiltration experiments. **Geoderma**, v. 262, p. 20-34, 2016.

DOS SANTOS POMPEU, Gisele do Socorro et al. Influência das características socioeconômicas de agricultores familiares na adoção de sistemas agroflorestais. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 54, n. 1, p. 33-41, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA- Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), 306p. 2006.

ENGEL, Vera Lex. Sistemas agroflorestais: conceitos e aplicações. **Botucatu: FEPAF**, 1999.

HAVERKAMP, R. et al. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer: 2. Physically based infiltration equation. **Water Resources Research**, v. 30, n. 11, p. 2931-2935, 1994.

KASSAMBARA, A. Practical Statistics in R for Comparing Groups: Numerical Variables, Independently Published, 204p. 2019.

LAL, R. Deforestation and land-use effects on soil degradation and rehabilitation in western Nigeria. II. Soil chemical properties. **Land Degradation & Development**, v. 7, n. 2, p. 87-98, 1996.

LASSABATERE, Laurent et al. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments—BEST. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 2, p. 521-532, 2006.

LUCAS, J. F. R.; TAVARES, M. H. F.; CARDOSO, D. L.; CÁSSARO, F. A. M. Curva de retenção de água no solo pelo método do papel-filtro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 6, p.1957-1973, 2011.

MELO, Mariana Cecilia et al. Determinação da função de condutividade hidráulica de um Latossolo do Cerrado. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 4, n. 3, p. 0327-0333, 2018.

MELO FILHO, José F. de; DO SACRAMENTO, José AAS; CONCEIÇÃO, Bruna PS. Curva de retenção de água elaborada pelo método do psicrômetro para uso na determinação do índice 'S' de qualidade física do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 5, p. 959-966, 2015.

MOREIRA, Wagner Henrique et al. Influência da altura de pastejo de azevém e aveia em atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico, após sete anos sob integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1315-1326, 2014.

NICODEMO, Maria Luiza Franceschi; BORGES, Wander Luis Barbosa; DE SOUZA, Isabela Malaquias Dalto. Atributos físicos do solo em quatro sistemas de uso da terra em São Carlos, SP. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 13, n. 2, p. 1-7, 2018.

OLNESS, Alan et al. Biosolids and their effects on soil properties. In: **Handbook of soil conditioners**. CRC Press. p. 141-165. , 1998.

POTT, Cristiano Andre et al. Qualidade física do solo em sistemas florestais, pecuários e integrados de produção. *Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science/Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*, v. 10, n. 2, 2017.

REYNOLDS, W. D. Saturated hydraulic conductivity: field measurement. **Soil sampling and methods of analysis**, 1993.

REYNOLDS, W. D. et al. Comparison of tension infiltrometer, pressure infiltrometer, and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 2, p. 478-484, 2000.

REYNOLDS, W. D. et al. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. **Soil and Tillage Research**, v. 96, n. 1-2, p. 316-330, 2007.

REYNOLDS, W. D. et al. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, v. 152, n. 3-4, p. 252-263, 2009.

ROCHA, Jonas Elias Castro da et al. Organic matter and physical-hydric quality of an oxisol under eucalypt planting and abandoned pasture. **Cerne**, v. 22, p. 381-388, 2016.

SAATH, Kleverton Clovis de Oliveira; FACHINELLO, Arlei Luiz. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 56, p. 195-212, 2018.

SALTON, J. C.; TOMAZI, M. Sistema radicular de plantas e qualidade do solo. **Embrapa Agropecuária Oeste-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 2014.

SANTOS, J. N.; PEREIRA, E. D. Carta de susceptibilidade a infiltração da água no solo na sub-bacia do rio Maracanã-MA. **Cadernos de Pesquisa**, São Luís, V. 20, n. especial, 2013.

SATTLER, Dietmar et al. Pasture degradation in South East Brazil: status, drivers and options for sustainable land use under climate change. In: **Climate Change Adaptation in Latin America**. Springer, Cham, p. 3-17. 2018.

SHAPIRO, Samuel Sanford; WILK, Martin B. Um teste de análise de variância para normalidade (amostras completas). **Biometrika** , v. 52, n. 3/4, pág. 591-611, 1965.

SILVA, MICHELANGELO DE OLIVEIRA et al. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 47838-47855, 2020.

SOUZA, Eduardo Soares de et al. Variabilidade espacial dos parâmetros hidrodinâmicos de duas parcelas agrícolas no estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1795-1804, 2008.

TEAM, R. Core et al. R: Uma linguagem e ambiente para computação estatística. 2013.

TEIXEIRA, Paulo César et al. Manual de métodos de análise de solo. **Brasília: Embrapa**, p. 573, 2017.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VILLARREAL, R. et al. Diffusivity and sorptivity determination at different soil water contents from horizontal infiltration. **Geoderma**, 338: 88-96, 2019.

XAVIER, F. R.; CARDOSO, I. M.; MENDONÇA, E.S. Fertilidade do solo em sistemas agroflorestais. In: **FERTBIO**. Maceió. 2012.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia proposta Beerkan forneceu valores aceitáveis de sorvidade e condutividade hidráulica saturada dos solos sob sistemas de pasto, Caatinga e agrofloresta, permitindo ajustes precisos das infiltrações acumuladas.

A altura da qual a água foi aplicada na superfície do solo sob o infiltrômetro de anel simples influenciou na condutividade hidráulica dos solos,  $K_s$ , e quando a água foi aplicada a uma altura mais próxima da superfície ( $h_{inf} = 0,03$  m), os valores médios de  $K_s$  foram maiores que aqueles obtidos sob uma altura maior ( $h_{inf} = 0,34$  m), sendo estes últimos mais aproximados aos resultados alcançados a partir dos experimentos realizados com o infiltrômetro aspersor.

A comparação entre metodologias para a caracterização hidrodinâmica dos solos, permitiu comprovar a aplicabilidade do infiltrômetro de anel simples, o qual se mostrou mais vantajoso em relação ao infiltrômetro aspersor, em termos de praticidade e viabilidade.

Os resultados dos parâmetros obtidos para a área de pastagem demonstraram, em maioria, o impacto negativo da compactação devido à mudança no uso do solo, ou seja, pela conversão da área de mata nativa da Caatinga em área de pasto.

Os indicadores da qualidade física do solo expressaram em sua maioria que existem diferenças na qualidade físico-hídrica dos solos, com maior destaque para as áreas de Caatinga e sistema agroflorestal. O sistema agroflorestal mostrou-se resiliente para recuperação de áreas degradadas, apresentando potencial para substituir a pastagem.

## ANEXO A1

### Calibração do simulador

#### a) Tamanho das gotas e Energia Cinética

As chuvas simuladas, assim como as chuvas naturais são passivas de variações no diâmetro de gotas, o que afeta diretamente na energia do impacto sobre a superfície. Atrelado a isso, é de grande valia que o equipamento simulador de chuvas reproduza gotas de maneira que, independente da dimensão, promovam impacto na sua velocidade final sobre o solo (CONFESOR, 2018). De acordo com Alves Sobrinho (2002), para o fenômeno de erosão, esse impacto das gotas sobre a superfície é um aspecto importante a ser considerado, visto que, o impacto das mesmas ocasiona o rompimento dos agregados do solo, desprendendo-os e favorecendo o arraste destes durante o processo de escoamento superficial. O impacto da gota pode ainda ocasionar o selamento cama superficial do solo, e conseqüentemente afetar a infiltração de água nesse meio (DA SILVA PEREIRA, 2021).

Em geral, a ação da chuva simulada sobre o solo é mensurada por meio da energia cinética das gotas ao atingirem a superfície. Para estimá-la, é necessária uma avaliação da distribuição das gotas (CARVAHO et al., 2012).

O tamanho e distribuição de gotas de chuvas naturais ou simuladas têm sido estabelecidos através da utilização de diversos métodos, entre eles: método da farinha de trigo (HUDSON, 1964), método da mancha (HALL, 1970), método do óleo (EIGEL e MOORE, 1983), método disdrômetro (JOSS E WALDVOGEL, 1969), dentre outros.

O método mais antigo e conhecido é o da farinha, descrito e revisado por Hudson (1964), o qual consiste em expor recipientes contendo uma camada de farinha de trigo à precipitação simulada por aproximadamente 2 a 4 segundos. O impacto das gotas na farinha formará grânulos, que posteriormente são levados à secagem ao ar por 24 horas e separados com o auxílio de peneiras de diferentes diâmetros. Após a separação, os grânulos são secos em estufa durante 24 horas a 105°C e, em seguida pesados em balança de precisão, de modo a se obter a massa média destes. O diâmetro da gota é determinado pela equação:

$$D = \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi\rho}} \quad (\text{A1.1})$$

sendo,  $D$  é o diâmetro da gota (mm);  $m$  é a massa média da gota (mg) e  $\rho$  é a massa específica da água ( $\text{mg mm}^{-3}$ ).

O volume de cada gota é calculado conforme a equação:

$$V = \frac{\pi D^3}{6} \quad (\text{A1.2})$$

onde,  $V$  é o volume da gota de água ( $\text{mm}^3$ ) e  $D$  é o diâmetro da gota (mm).

A velocidade terminal consiste na máxima velocidade em que as gotas precipitadas podem atingir, sendo estabelecida pela equação:

$$VT = \sqrt{\frac{9,81}{0,4671d^{-0,9859}}} \quad (\text{A1.3})$$

sendo,  $VT$  a velocidade terminal da gota ( $\text{m s}^{-1}$ ) e  $d$  o diâmetro da gota (mm).

Em conformidade com Meyer e McCune (1958), para que um simulador seja considerado eficiente, o mesmo deve apresentar relação entre a energia cinética da chuva produzida pelo aspersor e aquela da chuva natural superior a 75%.

## **b) Intensidade de chuva**

De acordo com Moore et al., (1983), o simulador de chuvas deve possibilitar a adaptação do mesmo conforme as características pluviométricas da região em estudo, permitindo, dessa maneira, o controle sobre as intensidades de precipitação e a duração das mesmas.

Para a calibração do simulador em diferentes intensidades de precipitação, conforme utilizado por Spohr et al. (2015), é realizada a distribuição de copos coletores sob o simulador de chuvas e aplicada a água por um determinado tempo e diferentes pressões. Ao término de cada simulação, o volume de água contido nos recipientes é aferido. Para cada teste, a intensidade média de precipitação é determinada pela equação:

$$i = \frac{h}{t} \quad (\text{A1.4})$$

sendo,  $i$  a intensidade média de precipitação média ( $\text{mm h}^{-1}$ );  $h$  a lâmina média de água precipitada ( $\text{mm}$ ) e  $t$  o intervalo de tempo ( $\text{h}$ ) transcorrido.

**d) Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)**

Para avaliação da uniformidade de aplicação da água por aspersão, na superfície do solo, pode-se fazer uso do proposto Christiansen (1942), mais conhecido como coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), conforme a equação:

$$CUC = 100x \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Xi - X|}{nX} \right) \quad (A1.5)$$

sendo, CUC o coeficiente de uniformidade de Christiansen, %;  $X_i$  a precipitação no pluviômetro de ordem  $i$ ,  $\text{mm}$ ;  $X$  a média aritmética das precipitações,  $\text{mm}$ ; e  $n$  o número de pluviômetros.

Dessa forma, no que diz respeito à uniformidade da distribuição das chuvas simuladas, Tossel et al. (1987) e Meyer e Harmon (1979) consideram apropriados valores de CUC iguais ou superiores a 80%. No entanto, para Minguntanna (2009) valores maiores que 70% são considerados eficazes.