

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO - UFRPE
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL - PPEAMB

LILIAN DANIELLI DA SILVA

**INFLUÊNCIA DO USO DE EFLUENTE DE ESGOTO DOMÉSTICO
TRATADO PARA IRRIGAÇÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICO-
HÍDRICAS DE UM SOLO EM REGIÃO SEMIÁRIDA.**

Recife - PE

2020

LILIAN DANIELLI DA SILVA

**INFLUÊNCIA DO USO DE EFLUENTE DE ESGOTO DOMÉSTICO
TRATADO PARA IRRIGAÇÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICO-
HÍDRICAS DE UM SOLO EM REGIÃO SEMIÁRIDA.**

Trabalho de dissertação submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientação: Prof. Marcus Metri Corrêa

Coorientação: Livia Previatello da Silva

Severino Martins dos Santos Neto

Recife – PE

2020

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)

- D111i da Silva, Lilian Danielli
Influência do uso de efluente de esgoto doméstico tratado para irrigação nas propriedades físico-hídricas de um solo em região semiárida. / Lilian Danielli da Silva. - 2020.
92 f. : il.
- Orientador: Marcus Metri Correa.
Coorientadora: Livia Previatello da Silva.
Inclui referências e apêndice(s).
- Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Recife, 2020.
1. Reúso. 2. Repelência à água. 3. Condutividade hidráulica . 4. Curva de retenção. 5. Método Beerkan . I. Correa, Marcus Metri, orient. II. Silva, Livia Previatello da, coorient. III. Título

CDD 620.8

LILIAN DANIELLI DA SILVA

**INFLUÊNCIA DO USO DE EFLUENTE DE ESGOTO DOMÉSTICO
TRATADO PARA IRRIGAÇÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICO-
HÍDRICAS DE UM SOLO EM REGIÃO SEMIÁRIDA.**

Trabalho de dissertação submetido ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco –UFRPE, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada em 06 de agosto de 2020.

Prof. Dr. Fernando Cartaxo Rolim Neto (Presidente da banca)
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

Prof. Dr. Antônio Celso Dantas Antonino (Primeiro membro)
Departamento de energia nuclear

Prof. Dr. Jean Manuel Fonseca Martins (Segundo membro)
Institut des Géosciences de l'Environnement

Coordenador do PPEAMB/UFRPE

Recife – PE
2020

AGRADECIMENTOS

À Deus, sem a benção e proteção do Senhor nada em minha vida poderia ser realizado. Até aqui o Senhor me ajudou através de livramentos, graça, saúde, inteligência e conquistas. Cada pessoa aqui citada e cada escolha tomada foi graças ao Seu amor por mim. Que a minha vida seja prova da Sua existência e lealdade.

À minha família por ter sido suporte, acolhimento e incentivo durante toda a minha jornada. Especialmente a minha mãe e minha madrinha. Jamais poderei retribuir com todo o merecimento os esforços que vocês duas fizeram para que eu conseguisse estudar em boas escolas, aproveitar as oportunidades e ter uma formação acadêmica. Larissa, obrigada por me incentivar aos estudos, ver o quanto você se dedicava sempre me motivou.

Ao meu noivo, Henrique, você foi meu suporte emocional durante todo momento. Obrigada pela paciência e dedicação, por entender quando eu estava nervosa, por me ajudar mesmo que você não tivesse ideia sobre o assunto, por ouvir - pacientemente - minhas reclamações quando algo no projeto não dava certo. Você é a minha pessoa favorita no mundo, obrigada.

Ao meu orientador Marcus Metri, obrigada pela orientação, bom humor e correções infinitas. Obrigada por ter me acompanhado nessa jornada e estar presente mesmo com o fuso França - Brasil. A equipe do DEN/UFPE. Agradeço ao INCT- ONDACBC pelos recursos e apoios financeiros para realização desse projeto. Ao professor Antonio Antonino, Romulo Menezes, Artur Coutinho, Dário Costa e toda equipe. Em especial a Lívia Previatello, Severino Martins (Neto), Lucas Ravellys e Larissa Fernandes, obrigada pela generosidade em oferecer o espaço, equipamento, tempo e recursos, mas, principalmente, conhecimentos.

Aos meus amigos de longas datas e aos meus amigos obtidos no mestrado, sem vocês o caminho teria sido mais penoso, muito obrigada. Priscila Lemos, Gilderlaine Lima só a gente sabe como foram longos os dias no laboratório, peneirando solo e fazendo análise de carbono, teria sido impossível sem vocês duas.

À Facepe pela bolsa concebida que foi fundamental durante todo o período. A UFRPE, professores e funcionários pela formação acadêmica e suporte.

RESUMO

A utilização de efluente doméstico tratado para irrigação é uma alternativa frente ao cenário de escassez hídrica presente em diversos países. A região do semiárido no nordeste brasileiro apresenta longos períodos de estiagem e tem como principal fonte de renda a agricultura familiar e a pecuária. O reúso apresenta-se como solução para produção de alimento do gado mesmo em períodos de seca evitando assim o êxodo rural. Porém, essas águas residuais apresentam altos teores de sais e matéria orgânica capazes de alterar a estrutura do solo e suas propriedades hidráulicas. Esse trabalho tem como objetivo avaliar as mudanças ocasionadas nas propriedades físicas e hídricas do solo devido a aplicação de águas residuais tratadas para o cultivo de palma forrageira, pelo período de seis anos em um solo de textura areia franca. Os ensaios de infiltração tridimensional do solo foram realizados em campo de acordo com a metodologia Beerkan, sendo também coletadas amostras de solo deformadas e indeformadas para caracterização física do solo e determinação da repelência à água no solo ocasionada por compostos hidrofóbicos presentes do efluente doméstico. O solo irrigado com águas residuais apresentou um incremento de aproximadamente 700% no teor de sódio no solo e dispersão de argila na camada superficial, provocando redução da taxa de infiltração do solo e na capacidade de retenção de água. Mesmo demonstrando mudanças nas propriedades físicas e no comportamento da água, o solo de textura arenosa mostrou-se resistente às mudanças provocadas pela irrigação com efluente doméstico tratado, sendo classificado como não repelente a água.

Palavras chave: Reúso, repelência à água, condutividade hidráulica, curva de retenção, método Beerkan, infiltração.

ABSTRACT

The use of treated wastewater in irrigation is an alternative solution to the hydric scarcity, which occur in several countries. The semiarid region in Brazilian northeast has long periods of drought and the major income source is family agriculture and livestock. The reuse shows as a solution to cattle food production even in dry periods, avoiding rural exodus. But those wastewater presents high levels of salt and organic matter, able to modify the soil structure and its hydraulic properties. This works aims to evaluate the changes in physic and hydric soil properties occasioned by the application of treated wastewater to the cultivation of forage palm, through 6 years, in sandy soil. The infiltration three-dimensional tests of soil were applied in the field following the Beerkan methodology and collected deformed and undeformed soil samples to the physic characterization of soil and to determine the water repellency in soil due to hydrophobic compost in domestic effluent. The soil irrigated with wastewater showed a 700% increase in sodium levels in soil, and clay dispersion in the surface layer, resulting reduction in soil infiltration rate and water soil retention capacity. Although showing physic properties changes and in water behavior, the sandy soil proved resistant to changes occasioned by treated wastewater irrigation, thus classified as non-repellent to soil water.

Keywords: Wastewater; water repellency; hydraulic conductivity; retention curve; Beerkan method; infiltration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Triângulo textural adotado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.....	9
Figura 2. Localização das unidades experimentais onde foram realizados os testes de infiltração e as coletas de solo.....	25
Figura 3. Plantio de palma forrageira irrigada por gotejamento com esgoto doméstico tratado.....	26
Figura 4. Localização do município de Santana do Seridó e das lagoas de estabilização da Estação de Tratamento de Efluente.....	26
Figura 5. Caracterização do Planossolo no município de Santana do Seridó-RN.....	27
Figura 6. Representação da malha experimental para as duas parcelas. Área (a) reuso e área (b) testemunha.....	28
Figura 7. Anel de 15 cm de diâmetro cravado no solo a 1 cm de profundidade (a); Volume de água 70ml convertido no anel (b) Cronometragem do tempo de infiltração e (c) planilha de monitoramento.....	29
Figura 8. Amostrador de Uhland (a) e amostra indeformada do solo para determinação da densidade do solo (b).....	29
Figura 9. Erlenmeyer com solução de Hexametáfosfato de sódio e solo no agitador de hélice.....	31
Figura 10. Determinação da distribuição granulométrica do solo por sedimentação (a) e por peneiramento (b).....	32
Figura 11. Coleta de amostra indeformada de solo, com amostrador de Uhland, para teste de repelência à água no solo.....	33
Figura 12. Ensaio de teste de repelência à água em cada 1 cm da amostra de solo.....	34
Figura 13. Pesagem de 0,5 gramas de cada amostra de solo e tubos de digestão pré-aquecimento.....	35
Figura 14. Ponto de viragem da titulação de verde para violeta escuro.....	36
Figura 15. Curvas granulométricas em solo sob irrigação com reuso e solo testemunha.....	41

A figura 16. Representação gráfica dos componentes texturais do solo exibidos pelo gráfico Boxplot.....	43
Figura 17. Classe textural de um Planossolo sob irrigação com reúso e solo testemunha.....	44
Figura 18. Representação gráfica pelo Boxplot da densidade do solo, densidade da partícula e porosidade.....	48
Figura 19. Representação gráfica, Boxplot, dos parâmetros de forma (m , n e η)	51
Figura 20. Representação gráfica, Boxplot, dos parâmetros de normalização e hidrodinâmicos.....	53
Figura 21. Curvas de retenção da água no solo sob irrigação com água de reúso (a) e solo testemunha (b).....	57
Figura 22. Curvas de retenção médias para o solo sob irrigação com reúso e para o solo testemunha.....	60
Figura 23. Curvas de condutividade hidráulica do solo sob irrigação com água de reúso (a) e solo testemunha (b).....	60
Figura 24. Curvas de condutividade hidráulica médias para o solo sob irrigação com reúso e para o solo testemunha.....	62
Figura 25. Representação gráfica, Boxplot, do tempo de penetração da gota para o solo com reúso e o solo testemunha.....	65
Figura 26. Valores médios do tempo de penetração da gota para cada 1 cm do solo com reúso e solo testemunha.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tamanho médio das partículas do solo.....	8
Tabela 2. Caracterização química do efluente tratado para irrigação e caracterização química dos solos com reúso e testemunha.....	27
Tabela 3. Estatística das frações granulométricas.....	42
Tabela 4. Estatística das propriedades físico-hídricas.....	47
Tabela 5. Estatística da densidade de partícula, carbono total e matéria orgânica.....	49
Tabela 6. Estatística dos parâmetros de forma das curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$ (m , n e η) do solo sob irrigação com reúso e solo testemunha.....	50
Tabela 7. Estatística dos parâmetros de normalização e hidrodinâmicos θ_s , K_s e h_g do solo sob irrigação com reúso e solo testemunha.....	52
Tabela 8. Estatística das escalas características do solo (λ_m , λ_c e C_{λ_m}).....	55
Tabela 9. Estatística do tempo de penetração da gota, carbono total e matéria orgânica.....	63

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ_s	Massa específica do solo	$M.L^{-3}$
m_s	Massa do solo seco	M
v_t	Volume total do solo	L^3
ρ_p	Massa específica da partícula	$M.L^{-3}$
v_s	Volume de sólido do solo	L^3
ϕ	Porosidade do solo	
v_p	Volume de poros	L^3
Θ	Função adimensional da umidade	
$\Theta(h)$	Umidade efetiva	
θ_i	Umidade volumétrica inicial	$L^3.L^{-3}$
θ_f	Umidade volumétrica final	$L^3.L^{-3}$
θ_s	Umidade volumétrica na saturação	$L^3.L^{-3}$
θ_r	Umidade residual	$L^3.L^{-3}$
D_f	Dimensão fractal do solo	
D	Diâmetro da partícula do solo	L
D_g	Parâmetro de escala do tamanho das partículas	L
F(D)	Distribuição do tamanho das partículas	
M	Parâmetro de forma da curva F(D)	
N	Parâmetro de forma da curva F(D)	
g	Aceleração da gravidade	$L.T^{-2}$
h	Potencial Matricial	L
h_{ea}	Potencial de entrada de ar	L
h_g	Parâmetro de normalização	L
λ_{tp}	Índice de distribuição do tamanho dos poros	
m	Parâmetro de forma $h(\theta)$	
n	Parâmetro de forma de $h(\theta)$	
η	Parâmetro de forma de $K(\theta)$	
k_f	Coeficiente de fuentes	
K	Condutividade hidráulica do solo	$L.T^{-1}$
K_s	Condutividade hidráulica saturada do solo	$L.T^{-1}$
$K(\theta)/K(h)$	Condutividade hidráulica não saturada	$L.T^{-1}$
S	Sorvidade do solo	$L.T^{-1/2}$
s	Dimensão fractal relativa do solo	
pm	Índice de forma do meio	
E	Dimensão de euclides	
λ_c	Escala de comprimento capilar	L
λ_m	Raio característico dos poros hidraulicamente ativos	L
$C\lambda_m$	Concentração de raio característico de poros	Nº de poros. L^{-2}
ρ_a	Massa específica da água	
δ	Parâmetro de forma da difusividade	
μ	Viscosidade dinâmica da água	

Sumário

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
2.1 Geral	15
2.2 Específicos	15
3. REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1 Escassez hídrica e seminário brasileiro	15
3.2 O reúso de esgoto doméstico na agricultura	17
3.3 Atributos físicos do solo	20
3.3.1. Textura do solo	20
3.3.2. Massa específica do solo	22
3.3.3. Massa específica da partícula	22
3.3.4 Porosidade do solo	23
3.4 Atributos hídricos do solo	24
3.4.1. Capacidade de retenção de água no solo	24
3.4.2. Condutividade hidráulica do solo	26
3.5 Metodologia Beerkan	28
3.6 Repelência do solo à água pela aplicação de efluente para irrigação	31
3.7 Influência do esgoto doméstico nos atributos físico-hídricos do solo	33
4. MATERIAL E MÉTODOS	36
4.1 Área de estudo	36
4.2 Procedimento experimental para o ensaio de infiltração	40
4.3 Procedimento experimental para o ensaio de granulometria, densidade do solo e densidade da partícula	42
4.4 Caracterização da repelência à água no solo.	45
4.4.1 Matéria Orgânica do solo	47
4.5 BEST- Algoritmo e análise dos dados	49
4.5.1 Determinação dos parâmetros de forma (m, n e η)	49
4.5.2 Determinação dos parâmetros de normalização (θ_s, K_s e h_g)	50
4.5.3 Escalas Características	52
4.6 Análise estatística	52
5. RESULTADO E DISCUSSÃO	53
5.1 Comportamento das camadas texturais do solo	53

5.2 Comportamento da infiltração em solo sob irrigação com reúso e solo testemunha	56
5.3 Comportamento das propriedades do solo em solo sob irrigação com reúso e solo testemunha.	58
5.3.1 Propriedades físico-hídricas ($\rho_s, \rho_p, \phi, \theta_i, \theta_f$)	58
5.3.2 Parâmetros de forma das curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$ (m, n e η).....	62
5.3.3 Parâmetros de normalização e hidrodinâmicos θ_s, K_s, h_g e S	64
5.3.4 Escalas características (λ_m, λ_c e $C\lambda_m$)	67
5.4 Curvas de retenção e de condutividade hidráulica da água no solo	68
5.5 Repelência	73
6. CONCLUSÃO	78
7. REFERÊNCIAS	79

1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios enfrentados atualmente em escala mundial é encontrar alternativas sustentáveis para garantir o desenvolvimento socioeconômico de uma região e prover o uso adequado dos recursos hídricos disponíveis.

De acordo com o relatório da Organização das Nações Unidas (2015), estima-se que a agricultura represente a principal fonte de consumo de água doce, pois do total consumido, cerca de 70% são utilizados em irrigação. A carência de disponibilidade desse recurso, em algumas regiões, é intensificada por ineficiência nas redes de distribuição, localização geográfica, falta de planejamento para períodos de secas e degradação dos recursos naturais (URBANO et al., 2017).

Mesmo o Brasil sendo classificado como um país de alto índice pluviométrico, possuir 12% de toda água doce disponível do planeta e ser considerado de baixo risco para escassez de água, algumas regiões têm um quadro severo de insuficiência hídrica (AZEVEDO, 2015). Isso se dá pela variabilidade espacial e temporal das condições climáticas e pelas dimensões continentais do país.

O semiárido brasileiro apresenta baixo desenvolvimento socioeconômico e isso está diretamente relacionado à escassez hídrica. Susceptível à desertificação, essa região apresenta elevada variabilidade espaço-temporal de chuvas, longos períodos de seca e concentração pluviométrica em poucos meses do ano (SIQUEIRA et al., 2006). A escassez prolongada causa sérios danos às atividades agrícolas e pecuárias, que representam a principal fonte de renda da população local (SANTOS et al., 2014). Outro fator limitante, segundo Lemos (2016), é que os solos encontrados nas regiões semiáridas são predominantemente os Latossolos, Argissolos, Neossolos, Luvisolos e Planossolos; pois esses apresentam algumas limitações físicas e químicas para práticas agrícolas como: acúmulo de argila, pouca matéria orgânica, pH ácido e drenagem irregular, o que os tornam pouco indicados para agricultura devido à baixa produtividade.

Frente a esse cenário e às necessidade de uma alternativa sustentável para geração de alimentos, o uso de águas residuais advindas de efluentes domésticos está sendo incentivado por programas públicos de irrigação e gestão dos recursos hídricos. Como exemplo, para a pesquisa em tela, tem-se o programa Palmas para Santana. Esse programa é desenvolvido pela prefeitura do município de Santana do Seridó, localizado no estado do Rio Grande do Norte

(RN), no qual o esgoto doméstico local é tratado e utilizado para irrigação de palma forrageira. O Instituto Nacional do Semiárido (INSA), em 2012, começou a pesquisar os efeitos da irrigação com efluente doméstico tratado nas propriedades do solo, e apoiar projetos como o Palmas para Santana. Para o INSA, a aplicação de água de reúso pode aumentar a matéria orgânica no solo e o teor de nutrientes, funcionando assim como um adubo líquido (INSA, 2016).

De fato, autores têm reportados que o uso de esgoto doméstico tratado para irrigação contribui na preservação de corpos hídricos, reduzindo a poluição, como também, reduzindo a quantidade de água retirada dos mananciais e disponibilizando-a para consumos que necessitem de uma maior qualidade, como no caso do abastecimento urbano (KURIAN et al., 2013; REIS et al., 2005; FEINERMAN e TSUR, 2014). O uso de efluente doméstico tratado também é uma solução sustentável para regiões que apresentam períodos de longa estiagem, pois essa prática possibilita o plantio, durante todo o ano, de cultivos para alimentação animal, aumentando a segurança alimentar da atividade pecuária. Além disso, a água de reúso, por conter mais nutrientes e maior quantidade de matéria orgânica, seria capaz de aumentar a microfauna do solo e reduzir o uso de fertilizante, beneficiando assim o sistema solo-planta (FONSECA et al., 2007; MARINHO et al., 2013; PEREIRA et al., 2011).

Por outro lado, as propriedades físicas, químicas e hídricas do solo podem ser alteradas caso haja utilização da água de reúso, para irrigação, por longos períodos. Um dos problemas associados a esta prática é o acréscimo de sais no solo, aumentando a salinidade e sodicidade do mesmo, conseqüentemente alterando a velocidade de infiltração de água no solo (BEDBABIS et al., 2014; LEUTHER et al., 2019). De acordo com Levy (2011), solos irrigados com água de esgoto tratada podem apresentar dispersão de argila e alteração significativa nos seus poros e agregados, modificando assim a estrutura e a dinâmica da água no solo. Devido a maior quantidade de sólidos suspensos pode ocorrer o entupimento de poros e redução na condutividade hidráulica saturada. De fato, parece existir um consenso de que o reúso de efluentes na agricultura pode alterar as propriedades físico-hídricas do solo e introduzir mudanças importantes na dinâmica da água, no entanto, tal prática necessita ser estudada com mais detalhes na busca de entender como as alterações físicas ocorrem ao longo do tempo e qual sua relação com a estrutura e composição do solo. A ocorrência de comportamento hidrofóbico do solo causado pela disposição de efluentes, por exemplo, deve ser levada em consideração na decisão do uso e manejo do efluente tratado para irrigação, pois há estudos que correlacionam o uso de esgoto doméstico tratado com a alteração na capacidade de infiltração

do solo e de caminhos preferenciais para o fluxo de água, diminuindo a sua capacidade de retenção hídrica, o que afeta a disponibilidade de água para o sistema solo-água-planta.

Diante do exposto, o presente trabalho tem o objetivo de avaliar os impactos do uso de esgoto doméstico tratado para irrigação nas propriedades físico-hídricas de um Planossolo localizado em uma área de reúso no município de Santana do Seridó-RN, com ênfase à sua permeabilidade, retenção e comportamento hidrofóbico do solo.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Identificar a influência do uso de esgoto doméstico tratado para irrigação nas propriedades físico-hídricas de um solo arenoso.

2.2 Específicos

- Identificar alterações na massa específica, na porosidade e no processo de infiltração da água no solo devido a aplicação de efluente doméstico tratado para irrigação;
- Identificar os efeitos da irrigação com esgoto doméstico tratado na capacidade do solo em reter água e na sua condutividade hidráulica;
- Avaliar se a irrigação com efluente doméstico tratado tornou o solo repelente à água devido ao incremento de matéria orgânica.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Escassez hídrica e seminário brasileiro

A água é considerada um recurso natural essencial para o desenvolvimento econômico e social de uma região. A intensificação dos períodos de seca ocasionado pelas mudanças climáticas, a poluição dos corpos hídricos e o crescimento populacional têm aumentado a demanda por água doce ocasionando um quadro de escassez hídrica (KAUR et al., 2010; NAZARI et al., 2018; RONCO et al., 2018).

Atrelado a esses fatores, nas regiões semiárida, a problemática da escassez hídrica se agrava devido as condições edafoclimáticas. As áreas áridas e semiáridas cobrem 40% da superfície da Terra. No Brasil, o semiárido corresponde a 980 mil km², 1.135 municípios distribuídos em nove estados da Federação: Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e Minas Gerais (BRASIL, 2005).

O clima semiárido é característico por apresentar escassez e irregularidade de chuvas com grande variabilidade espacial e temporal, além de eventos extremos onde chega a ocorrer o total esperado para todo um mês em apenas algumas horas (SILVA et al., 2013). Apresenta uma evapotranspiração maior que a precipitação total anual, provocando assim um cenário de balanço hídrico negativo, altas temperaturas e baixa umidade relativa. De acordo com Oliveira (2009), além da escassez anual de chuvas durante o período de seca, o semiárido nordestino apresenta secas periódicas prolongadas a cada dez anos.

De acordo com Cirilo et al. (2007), os sistemas atmosféricos responsáveis pela precipitação no semiárido nordestino são: as frentes frias vindas da região sul do país; ciclones na média e na alta atmosfera; as ondas de leste; as brisas terrestres e marítimas; as oscilações de 30-60 dias e a ZCIT (Zona de Convergência Intertropical). Dentre esses, o que mais se destaca quanto se estuda os picos de precipitação no semiárido está o deslocamento da Zona de Convergência Intertropical, devido a oscilação das temperaturas entre o Atlântico Sul e Norte. Esse evento determina o quão abundante ou insuficiente serão as chuvas, como também é o principal responsável pela concentração da precipitação em apenas quatro meses durante o ano (SILVA et al., 2017).

De acordo com a Embrapa (2012) e o IBGE (2017), para caracterizar o clima como semiárido, a precipitação total anual deve ser inferior a 800 mm, concentrada em poucos meses, evapotranspiração média de 2000 mm/ano, temperatura média anual de 23°C a 27°C e umidade relativa média de 50%. A classificação climática de Köppen-Geiger define as regiões de clima semiárido como BSh (Clima semiárido quente) e BSk (Clima semiárido frio).

A variação da disponibilidade de água dessa região, juntamente com contrastes físicos e químicos dos solos encontrados levou o aparecimento de diferentes tipos de vegetação principalmente em forma de mosaico (ROCHA, 2009). Apesar da variedade de paisagens e ambientes encontrados no semiárido brasileiro a vegetação da caatinga é o bioma mais característico da região semiárida. Possui 1500 espécies e são adaptadas à aridez local, porém bastante influenciáveis pelas condições ambientais. Quando em áreas mais secas, com baixo

volume de precipitação, e de solos mais pedregosos, a caatinga reduz os seus arbustos, tornando a vegetação mais baixa, podendo perder totalmente sua folhagem para economizar água (GIULIETTI et al., 2006).

Os solos encontrados em regiões semiáridas apresentam algumas características em comum. Jacomine (1996) dividiu a região em três áreas conforme o material originário das rochas: áreas de cristalino com predomínio de gnaisses, granitos, migmatitos e xistos; áreas de cristalino recobertas por materiais mais ou menos arenosos e áreas sedimentares.

Devido à geologia, ao relevo e à baixa precipitação, geralmente os solos encontrados são mais jovens, pouco evoluídos, rasos e com tendência a salinização. Os solos predominantes e suas distribuições percentuais são, Neossolos Litólicos (19,2%), Latossolos (21%), Argissolos (14,7%), Luvisolos (13,3%), Neossolos Quartzarênicos (9,3%), Planossolos (9,1%), Neossolos Regolíticos (4,4%) e Cambissolos (3,6%) e 5,4 % distribuído entre outros (CODEVASF, 1999; JACOMINE, 1996).

Para o uso agrícola, a grande maioria dos solos encontrados nas regiões semiáridas devem ser manejados quimicamente, já que possuem pH ácido. Determinados solos são mais suscetíveis a erosão como os Luvisolos e os Neossolos Litólicos, outros apresentam textura mais grosseira, o que aumenta a taxa de infiltração como os Neossolos Quartzarênicos e Regolíticos, já os Planossolos geralmente contêm altos teores de sódio (CODEVASF, 1999).

Por causa dessas características climática que promovem a limitação dos recursos hídricos, o desenvolvimento econômico é bastante prejudicado, principalmente nos momentos de seca. Este fator prejudica as principais atividades locais, agricultura familiar e pecuária, ambas altamente dependentes da chuva, incentivando o êxodo rural (IBGE, 2013).

3.2 O reúso de esgoto doméstico na agricultura

No Brasil, a agricultura é uma atividade altamente lucrativa, sendo responsável, em 2017, por 23% no produto interno bruto. Porém, é uma das atividades que mais demanda o uso dos recursos hídricos (IBGE, 2017). Sabe-se que atualmente mais de quatro milhões de hectares são irrigados e que 70% de toda água captada em fontes superficiais são utilizadas para irrigação de culturas agrícolas. Devido as grandes vazões envolvidas nessa atividade, o crescimento populacional e a escassez hídrica inerente de algumas regiões, o suprimento de alimentos não poderá ser mantido sem fontes alternativas para irrigação (BRAGA et al., 2005).

De acordo com Kurian et al. (2013), o uso de efluente tratado tem sido um meio sustentável frente a escassez hídrica, ao consumo de água pela atividade agrícola e proteção dos mananciais. Esta prática já é utilizada há décadas por países como Estados Unidos, Canadá, França, Egito e Israel. Segundo Mohammed (2019), aproximadamente 200 milhões de hectares em mais de cinquenta países são irrigados com água residual tratada e não tratada para o enfrentamento de escassez hídrica.

A fazenda do Bahr-Elbaqar, no Egito, com 1250 hectares faz uso de águas residuais com tratamento primário para irrigação por aproximadamente 100 anos, movimentando a economia local (ABDEL-SHAFY & ABDEL-SABOUR, 2006). Outro exemplo de destaque quando se trata de reúso para irrigação é o Vale do Mezquital, no México. O esgoto que inicialmente era um problema sanitário para cidade passou a ser tratado e utilizado para irrigação em grande escala, mais de 70 mil hectares utilizam esgoto doméstico tratado na agricultura o que aumentou a renda agrícola local de quase zero para 4 milhões de dólares (LEMOS, 2016; SILVA & SILVA, 2004). Em Israel aproximadamente 75% das águas residuais são tratadas e utilizadas para irrigação. Essas águas cobrem 50% do consumo utilizado na agricultura (OCDE, 2015).

No Brasil, o uso de esgoto doméstico tratado para fins agrícolas ainda não é muito difundido nem aceito pela população. Isso pode ser atribuído ao fato de não existir uma legislação específica, o que torna as pesquisas e práticas com pouco controle e padronização (LEMOS, 2016; ARAÚJO, 2000). Porém, existem alguns projetos pilotos como o Palmas para Santana, no Rio grande do Norte. Esse projeto acontece no município de Santana do Seridó que apresenta 96% da zona urbana saneada. Aproximadamente 270 mil litros de efluente são tratados diariamente na Estação de Tratamento de Efluente (ETE), por meio de processos biológicos e de filtração, e parte do efluente tratado é utilizado na irrigação de palma forrageira. A palma forrageira é destinada para alimentação animal e para bancos de estoque, tornando viável a pecuária local mesmo em períodos de seca.

O reúso de água para irrigação permite a produção agrícola durante os períodos de seca favorecendo a economia local do semiárido que se baseia na agricultura familiar. No contexto ambiental, o esgoto doméstico tratado quando utilizado na irrigação reduz a poluição das águas superficiais devido à redução da carga orgânica e microrganismos patogênicos lançados nos corpos hídricos, diminuindo também a eutrofização de lagos. No âmbito econômico, o reúso de esgoto tratado reduz a necessidade de fertilização mineral dos cultivos, por apresentar altos

níveis de nitrogênio e fósforo, maior produtividade vegetal além de viabilizar o aumento da área irrigada (SILVA & SILVA, 2004).

Contudo, se faz necessário medidas preventivas já que o uso desse efluente pode ocasionar alguns efeitos negativos para o sistema solo-planta. Devido a quantidade elevada de sais e nutrientes, a irrigação com águas residuais pode alterar as características químicas e físicas do solo, podendo limitar o crescimento vegetal (SNEL, 2002; MARINHO et al., 2013; ELGALLAI et al., 2016; FARHADKHANI, 2018). O uso de águas residuais por longos períodos pode alterar a dinâmica da água no solo devido a dispersão das partículas de argila, aumento do sódio, acréscimo no valor do pH e desestruturação dos agregados. Além disso, alguns autores alertam sobre o aumento do teor de metais pesados no solo e do acúmulo de componentes hidrofóbicos em sua camada superficial (HALLIWELL et al., 2001; BECERRA-CASTRO et al., 2014).

Para Cappola et al. (2004), existem diversos trabalhos que investigam a relação entre águas residuais com alterações químicas e biológicas no solo, mas os autores defendem que as características físicas e hidrológicas do solo devem ser consideradas para definir as diretrizes no gerenciamento de águas residuais.

Mohammed (2019) identificou sete regiões ao leste do delta do Nilo, no Egito, e determinou 15 características para avaliar a qualidade do solo através de índices de qualidade do solo. Seis dessas áreas utilizavam água residual tratada para irrigação há pelo menos 25 anos e uma área irrigada com água doce. O autor identificou uma influência negativa na salinidade do solo, condutividade elétrica, percentagem de sódio trocável e na razão de absorção de sódio com a aplicação de água residual tratada. Contudo foi possível verificar uma melhora em alguns indicadores do solo, como matéria orgânica, nitrogênio total, fósforo e potássio.

Leuther et al. (2019) compararam o solo de dois pomares na planície costeira de Israel, um de textura mais fina, argilosa e outro de textura mais arenosa. Os solos foram irrigados por gotejamento e vem sendo aplicada água residual tratada por aproximadamente 30 anos. Foi analisado que a irrigação por longo período provocou alterações diferentes dependendo da textura do solo. O solo arenoso apresentou maior resistência as modificações, já no solo argiloso houve mudanças na composição textural, salinidade e absorção de sódio, o solo arenoso não modificou sua estrutura, mas teve considerável aumento na razão de absorção de sódio bem como maior lixiviação de silte e argila na camada superficial.

3.3 Atributos físicos do solo

As propriedades físicas do solo como textura, granulometria e massa específica estão diretamente relacionadas à estrutura do solo, ao movimento da água no solo e sua capacidade de armazenamento. De acordo com Lima et al. (2006), o conhecimento dessas características influencia nos cálculos de irrigação, manejo, monitoramento de compactação e qualidade do solo.

3.3.1. Textura do solo

A textura do solo está relacionada a distribuição, por tamanho, das partículas do solo, representando a proporção de areia, silte e argila. O tamanho das partículas, no Brasil, é dividido de acordo com a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (EMBRAPA, 1979) que define quatro classes de tamanho de partículas menores que 2 mm (Tabela 1).

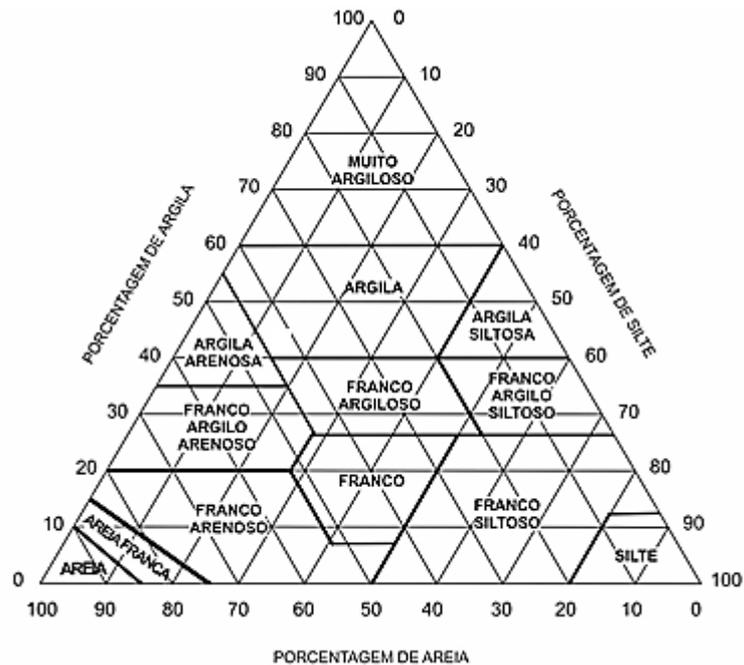
Tabela 1. Tamanho médio das partículas do solo

Fração do solo	Diâmetro da partícula
Areia Grossa	0,2 - 2 mm
Areia Fina	0,05 - 0,2 mm
Silte	0,002 - 0,05 mm
Argila	< 0,002 mm

Fonte: Autor.

A análise granulométrica é feita em laboratório pelos processos de sedimentação e peneiramento desconsiderando a presença da matéria orgânica e de partículas de solo maiores do que 2 mm, sendo assim, uma massa de solo pode ter de 0 a 100% de areia, silte e argila. As combinações possíveis a partir dessas três classes são inúmeras o que impulsionou o desenvolvimento gráfico de classificação conhecido como triângulo textural no qual divide as proporções possíveis em 13 classes texturais (Figura 1).

Figura 1. Triângulo textural adotado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.



Fonte: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2019.

A classe textural de um solo não varia muito ao longo do tempo, sendo necessário longo período para ocorrer algum tipo de variação natural ou devido à erosão, migração de argila e intemperismo. Porém, a informação sobre a classe textural de um solo permite identificar comportamentos comuns em relação ao movimento da água no solo e de algumas propriedades físico-hídricas. Os solos com maior porcentagem de argila apresentam maior porosidade do solo, maior capacidade de retenção de água, drenagem lenta, são plásticos e mais resistentes à erosão quando comparados aos solos arenosos.

De acordo com Reichardt & Timm (2004), a estrutura do solo está relacionada a quase todos os fatores que agem sobre o solo como porosidade, densidade do solo, capacidade de armazenamento, disponibilidade de nutriente, penetração de raízes, aeração, entre outros.

A textura do solo impacta o comportamento da curva de retenção de água no solo. Os solos que apresentam texturas mais finas retêm mais água enquanto que os solos mais grosseiros tendem a reter uma menor quantidade. Para Trentin (2005) e Petersen et al. (1988), a textura do solo é tão importante que mesmo quando dois solos apresentam a mesma textura ainda pode existir diferenças significativas nas curvas de retenção devido a diferenças de granulometria. Outros fatores que também podem influenciar são matéria orgânica, tipo de argila e diferenças de microestrutura.

3.3.2. Massa específica do solo

A massa específica do solo (ρ_s), [$M.L^{-3}$], é a relação entre a massa de solo seco (m_s), [M], e o volume total do solo (v_t), [L^3], demonstrado na equação 1.

$$\rho_s = \frac{m_s}{v_t} \quad (1)$$

Essa equação está relacionada com a estrutura e textura do solo, orientação e dimensão das partículas, sendo bastante influenciada pelo manejo e intervenções antrópicas como também com a composição química do solo (AGUIAR, 1998).

É uma propriedade indicadora do grau de compactação do solo. Em condições naturais o esperado é que quanto maior for a profundidade do solo maior o incremento em sua massa específica, porém, essa relação pode ser afetada pelo manejo inadequado, uso de irrigação, compostos químicos e maquinários agrícolas que provocam a compactação do solo, alteram sua estrutura e conseqüentemente reduzem seu volume total fazendo com que aumente a massa específica do solo. Quanto maior a compactação na camada superficial do solo, menor será a porosidade e estruturação dos agregados, e isso afeta a infiltração do solo e sua capacidade de retenção de água sendo esses fatores limitantes para o desenvolvimento de culturas (CAVENAGE et al., 1999; MARCOLIN, 2006; TEIXEIRA, 2008).

A ρ_s de solos argilosos varia entre 0,9 a 1,6 $g.cm^{-3}$, enquanto a faixa de variação dos solos arenosos é de 1,3 a 1,8 $g.cm^{-3}$. Os menores valores observados em solos argilosos devem-se a micro agregação das partículas de argila que aumentam a porosidade. Nos solos orgânicos, devido à grande presença de matéria orgânica e melhor estruturação dos agregados, a massa específica do solo pode variar de 0,2 a 0,6 $g.cm^{-3}$ (LIBARDI, 2005).

3.3.3. Massa específica da partícula

A massa específica da partícula (ρ_p), [$M.L^{-3}$], é representada pela relação entre a massa de solo seco (m_s), [M], e o volume de sólido do solo (v_s), [L^3]. Essa propriedade não leva em consideração os espaços vazios no solo (Equação 2).

$$\rho_p = \frac{m_s}{v_s} \quad (2)$$

A massa específica da partícula depende da composição química e mineralógica dos solos e não sofre interferência com o manejo e ações antrópicas (OTTONI, 2005). Por isso, a massa específica da partícula não apresenta grandes variações ao longo do tempo. Os principais constituintes do solo são quartzo, feldspatos e silicatos de alumínio coloidais, cujas densidades são, em média, $2,65 \text{ g. cm}^{-3}$, justamente por isso, é comum adotar esse valor para todos os tipos de solo. Vale salientar que os valores de densidade da partícula podem variar entre 2,30 e 2,90 g.cm^{-3} , dependendo da mineralogia e da quantidade de matéria orgânica. A densidade da matéria orgânica varia entre 0,6 a 1,0 g.cm^{-3} , logo, quanto maior o seu teor em um solo mais baixa será a densidade de partícula desse solo.

De acordo com Teixeira (2008), determinar essa propriedade é importante para os cálculos de sedimentação e determinação da porosidade do solo.

3.3.4 Porosidade do solo

A porosidade (φ) é o volume de vazios no solo que pode ser preenchido por água e ar (Equação 3). É representada pela relação entre o volume de poros (V_p), [L^3], e o volume total do solo (v_t), [L^3].

$$\varphi = \frac{v_p}{v_t} \quad (3)$$

A porosidade é inversamente proporcional a densidade do solo variando de acordo com o grau de compactação. É influenciada pela textura e estrutura dos agregados que interferem no tamanho, continuidade e quantidade de poros no solo. Sendo assim, essa também é uma propriedade altamente influenciada pelo manejo e práticas agrícolas.

Os poros encontrados no solo são de diferentes tamanhos e formas, sendo usualmente classificados em macro e microporos. Os macroporos não conseguem reter água devido ao diâmetro dos seus poros e são facilmente esvaziados devido à gravidade. Já os microporos

conseguem reter água contra a ação da gravidade armazenando água no solo e disponibilizando-a para as plantas (CAVALCANTI, 2012).

Os solos arenosos têm partículas de maior diâmetro e quando agregadas formam os macroporos, normalmente se organizam numa disposição piramidal tendo assim menor espaço de vazios, diferente dos solos argilosos de textura mais fina que conseguem se organizar de tal modo que formem poros de menor diâmetro e conseqüentemente um maior volume de poros. De acordo com Rabelo (2000), os solos arenosos têm em média de 34 a 50 % de porosidade, os solos argilosos de 40 a 60 % e os solos ricos em matéria orgânica apresentam de 60 a 80%.

3.4 Atributos hídricos do solo

Cavalcanti (2012) e França Neto (2018a) defendem que o processo de transferência de água no solo é afetado basicamente por duas propriedades, sendo elas: curva de retenção de água no solo, que é relação entre a umidade volumétrica e o potencial matricial de água no solo e a curva de condutividade hidráulica do solo, que é a relação entre a capacidade de conduzir água em determinada umidade volumétrica.

3.4.1. Capacidade de retenção de água no solo

A retenção de água no solo está relacionada com a sua capacidade em armazenar água, sendo uma propriedade hidráulica que descreve a relação entre a umidade volumétrica e o potencial matricial do solo.

A capacidade do solo em armazenar água depende do teor de umidade e seu comportamento é representado por uma curva. A curva de retenção de água no solo é a relação entre o potencial matricial e o conteúdo de água.

De acordo com Silveira (2000), a retenção de água permite observar o comportamento do solo quando não saturado conforme esse é submetido tanto ao secamento, força de sucção, quanto ao aumento das forças matriciais do solo. A estrutura do solo, a quantidade e continuidade dos poros e principalmente a textura influenciam na capacidade de retenção de água.

De acordo com Libardi (2005), a capilaridade do solo que ocorre nos microporos dos agregados, e a adsorção, onde a retenção ocorre na superfície dos sólidos, são os dois principais processos que explicam a retenção de água no solo.

A composição do solo afeta diretamente na sua capacidade de reter água. Os solos arenosos, por possuírem partículas maiores, não apresentam boa agregação e conseqüentemente têm predominância de macroporos. Isso faz com que os solos com maior teor de areia apresentem uma redução na capacidade de reter água e decréscimo abrupto da umidade devido ao escoamento de água de percolação. Já nos solos argilosos, é possível observar um comportamento inverso. Por conter uma maior quantidade de microporos, o solo argiloso, consegue armazenar mais água por mais tempo, fazendo com que a redução da umidade seja de forma gradativa (TUCCI, 2009; FRANÇA NETO et al., 2018b).

O método mais conhecido para determinar a retenção de água no solo é a câmara de pressão de Richards (RICHARDS, 1965). Esse método consiste basicamente em colocar as amostras de solo em placas porosas, essas placas ficam fixadas no interior de uma câmara de pressão e em seguida são aplicadas pressões para a retirada de água das amostras. Entretanto existem algumas dificuldades quanto a sua aplicação: determinar o ponto de equilíbrio ideal entre a pressão aplicada e a água retirada do solo, custo do equipamento, manter o contato entre a amostra e as placas porosas, e o tempo para realizar as leituras (TAVARES et al., 2008).

Diversos modelos foram desenvolvidos para descrever o comportamento da curva de retenção da água no solo (GARDNER, 1958; BROOKS & COREY, 1964; VAN GENUCHTEN, 1980; ZHANG & VAN GENUCHTEN, 1994). Dentre os mais citados na literatura estão:

Brooks & Corey (1964):

$$\theta(h) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{h}{h_{ea}}\right)^{-\lambda_{tp}} \text{ para } h \leq h_{ea} \quad (4)$$

Sendo, $\theta = \theta_s$ para $h_{ea} \leq h \leq 0$

- Van Genuchten (1980):

$$\theta(h) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[1 + \left(\frac{h}{h_g}\right)^n\right]^{-m} \quad (5)$$

Com $m = 1 - \frac{1}{n}$, $n > 1$ Mualen (1976)

$m = 1 - \frac{2}{n}$, $n > 2$ Burdine (1953)

Sendo $\Theta(h)$ a umidade efetiva [$L^3.L^{-3}$]; θ_s a umidade na saturação [$L^3.L^{-3}$]; θ_r a umidade residual [$L^3.L^{-3}$]; h o potencial matricial [L]; h_{ea} e h_g [L] parâmetros de ajuste que dependem da estrutura do solo e λ_{tp} , m e n parâmetros de forma.

3.4.2. Condutividade hidráulica do solo

A condutividade hidráulica representa a facilidade com que um fluido, no caso a água, vai se movimentar pelo espaço poroso do solo. Sendo assim é dependente tanto das propriedades do fluido como das propriedades do solo. É um parâmetro determinante para obras de drenagem, manejo de culturas, planejamento de irrigação, transporte de solutos, controle de poluição do lençol freático e da erosão (GONÇALVES & LIBARDI, 2013).

O valor da condutividade hidráulica depende da umidade do solo e quanto maior for a umidade maior será a condutividade hidráulica. Portanto, para um dado solo, a condutividade hidráulica máxima ocorre quando o solo se encontra com todos os seus poros preenchidos por água e se denomina condutividade hidráulica do solo saturado (K_s). Quando o solo não se encontra saturado a condutividade hidráulica do solo (K_θ) apresentará um valor menor que K_s e será expresso em função da umidade.

Segundo Feitosa et al. (2008), a condutividade hidráulica do solo pode variar de acordo com várias propriedades físicas como a porosidade, tamanho, quantidade e continuidade dos poros, índice de vazios, arranjo das partículas, umidade e também é influenciada pela viscosidade e massa específica do fluido. Sendo assim, pode apresentar elevada variação espacial, mesmo em um solo de igual textura, podendo apresentar valores extremos em determinados locais. Segundo Warnick & Nilsen (1980), a condutividade é a propriedade do solo que apresenta a maior variabilidade espacial.

De acordo com Libardi (2006), a condutividade hidráulica saturada do solo pode depender mais da sua estrutura do que da textura devido ao arranjo dos agregados, portanto, ao elevar o grau de agregação do solo também se eleva o valor de K_s .

Existem vários métodos para a determinação da condutividade hidráulica saturada do solo, porém essas técnicas são onerosas e demandam muito tempo. Devido à alta variabilidade do K_s , para que haja determinação em laboratório, se faz necessário a coleta de um grande número de pontos e mesmo assim não faz jus a realidade do campo, pois as amostras podem ser acondicionadas de tal modo que modifique suas estruturas, sejam compactadas remodelando o arranjo dos agregados, secas e, conseqüentemente, fragmentadas (SOUZA et al., 2008a).

A determinação em campo torna-se mais representativa. No campo, a condutividade hidráulica do solo saturado é realizada por ensaios de infiltração com a ajuda de um cilindro metálico cravado no solo no qual a água infiltra até que a taxa de infiltração se torne constante. Neste momento, admite-se que o regime é permanente e a condutividade hidráulica saturada será a velocidade de infiltração.

Matematicamente a condutividade pode ser expressa em função das propriedades do fluido, matriz e teor de umidade do solo (Equação 6).

$$K(\theta) = \left(\frac{k\rho_{ag}g}{\mu_{vd}} \right) K_r(\Theta) \quad (6)$$

Sendo, $K(\theta)$ a condutividade hidráulica [$L.T^{-1}$], k a permeabilidade intrínseca [L^2], ρ_{ag} é massa específica da água [$M.L^{-3}$], g a aceleração da gravidade [$M.T^{-2}$], μ_{vd} é o coeficiente de viscosidade dinâmica [$M.T^{-1}.L^{-1}$] e $K_r(\Theta)$ é a permeabilidade relativa, que varia entre 0 e 1. A permeabilidade relativa, $K_r(\Theta)$, leva em conta a dependência da condutividade hidráulica sobre a umidade (θ) ou do potencial matricial (h).

Diversas teorias foram propostas para a condutividade hidráulica relativa (CHILDS & COLLIS-GEORGE, 1950; BURDINE, 1953; GARDNER, 1958; BROOKS & COREY, 1964; MUALEN, 1976; Van GENUCHTEN, 1980; ZHANG & Van GENUCHTEN, 1994). As teorias desenvolvidas por Burdine (1953) e Mualem (1976) permitem a derivação analítica de uma série de importantes funções hidráulicas do solo. Os modelos de Brooks & Corey (1964) e de Van Genuchten (1980), foram originados a partir dessas teorias. A equação desenvolvida por Burdine (1953) é representada por:

$$K_r(\Theta) = (\Theta)^2 \left[\frac{\int_0^\Theta \frac{d\Theta}{h^2}}{\int_0^1 \frac{d\Theta}{h^2}} \right]^2 \quad (7)$$

E pela teoria de Mualem (1976), $K_r(\Theta)$ é descrito por:

$$K_r(\Theta) = (\Theta)^{1/2} \left[\frac{\int_0^\Theta \frac{d\Theta}{h}}{\int_0^1 \frac{d\Theta}{h}} \right]^2 \quad (8)$$

Sendo Θ uma função adimensional da umidade (θ) ou da pressão da água no solo (h). Essas teorias combinadas com as curvas de retenção de Brooks & Corey (1964) e de Van Genuchten (1980), podemos obter as seguintes expressões:

- Brooks & Corey (1964):

$$K(\theta) = k_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \eta \quad (9)$$

Sendo η um parâmetro de forma.

- Van Genuchten (1980):

$$K(\theta) = k_s(\theta)^2 \left[1 - \left(1 - (\theta)^{\frac{1}{m}} \right)^m \right] \quad (10)$$

Com $m = 1 - \frac{2}{n}$, $n > 1$ Burdine (1953)

$$K(\theta) = K_s(\theta)^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - (\theta)^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (11)$$

Com $m = 1 - \frac{1}{n}$, $n > 1$ Mualen (1976)

3.5 Metodologia Beerkan

A metodologia Beerkan foi proposta por Haverkamp et al. (1994) com o intuito de simplificar a determinação das propriedades hidrodinâmicas do solo. O método de Beerkan é um modelo semi-físico que determina matematicamente o movimento da água no solo de modo mais simplificado e menos oneroso, quando comparado com outros métodos experimentais, já que se fundamenta em ensaios de infiltração simples e na distribuição dos tamanhos das partículas do solo (Souza, et al., 2007). O ensaio baseia-se na utilização de um anel simples, que permite a infiltração tridimensional sob carga positiva h_{sup} . Deve-se anotar o tempo decorrido para que um volume de água conhecido infiltre completamente. O ensaio é finalizado quando o fluxo atinge seu regime permanente. Antes e após o ensaio de infiltração é necessário a coleta de solo para determinar a umidade inicial, umidade final, densidade do solo e a distribuição do tamanho das partículas.

Nesse método é estimado os parâmetros da curva de retenção de água no solo $\theta(h)$ e da condutividade hidráulica $K(\theta)$ levando em consideração a textura e a estrutura do solo e descrito analiticamente por cinco parâmetros: dois de forma e três de normalização (HAVERKAMP et al., 1998; BRAUD et al., 2004; LASSABATÉRE et al., 2006; SOUZA et al., 2006; SOUZA et al., 2007).

A metodologia do Beerkan se baseia nas propriedades estáticas e dinâmicas do solo, e pode ser ajustada para obter parâmetros importantes na descrição do comportamento hidráulico do meio como a condutividade saturada (K_s) e a sorvidade (S). Nesse modelo, as curvas de retenção de água no solo (Equação 12), $\theta(h)$, e as curvas de condutividade hidráulica (Equação 13), $K(\theta)$, são descritas respectivamente por Van Genuchten (1980) e Brooks & Corey (1964).

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[1 + \left(\frac{h}{h_g} \right)^n \right]^{-m} \quad (12)$$

$$\text{Sendo } m = 1 - \frac{2}{n} \quad (\text{BURDINE, 1953})$$

$$K(\theta) = k_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\eta \quad (13)$$

No qual θ representa a umidade volumétrica [$L^3.L^{-3}$]; θ_r a umidade volumétrica residual [$L^3.L^{-3}$]; θ_s a umidade volumétrica saturada [$L^3.L^{-3}$]; h o potencial matricial [L]; h_g [L] representando um valor de escala de h ; m e n são parâmetros de forma; K_s a condutividade saturada do solo [$L.T^{-1}$] e η o parâmetro de forma para curva de condutividade hidráulica.

Essas equações são caracterizadas, analiticamente, por parâmetros de forma representados por (n , m e η) e parâmetros de normalização (θ_s , K_s , h_g e θ_r). Normalmente o θ_r é muito baixo, sendo assim é considerado zero para os cálculos. Os parâmetros de forma estão relacionados à textura do solo, dependendo assim, da porosidade e da curva de distribuição do tamanho das partículas (Haverkamp et al., 1998), já os parâmetros de normalização estão associados aos ensaios de infiltração pois dependem da estrutura do solo (CAVALCANTI, 2012). Os parâmetros de forma e de normalização são determinados utilizando o BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters Through Infiltration Experiments), desenvolvido por Lassabatère et al. (2006).

Jaramilo et al. (2019) produziram uma revisão de literatura na qual foi realizado um apanhado sobre a utilização da metodologia Beerkan. Nessa, os autores buscaram aplicações do BEST que vem sendo realizadas em todo o mundo e em diversas tipos de solo e discutiram sua aplicabilidade e funcionalidade do ponto de vista prático e teórico. Como conclusão os autores destacaram alguns pontos: concluíram que o BEST é uma ferramenta eficaz para caracterização hidráulica do solo diretamente do campo, além de descrever informações precisas sobre infiltrações cumulativas tanto no estado transitório quanto no estado estacionário. Porém, identificaram que para solos muito finos o ensaio pode tornar-se muito longo e inviável fazendo com que o programa BEST superestime a taxa final de infiltração. Erros quanto a taxa de infiltração podem ocorrer também para solos muito grossos porque o estado transitório é restrito a um período muito curto de tempo.

Devido as propriedades hidrodinâmicas do solo serem altamente influenciadas pela textura e estrutura, Souza et al. (2008b) utilizaram o método Beerkan para caracterizar dois solos, com três diferentes texturas. Os ensaios de infiltração foram realizados na Paraíba em um Latossolo Amarelo, de classes texturais: franco-argiloso, franco-argilo-arenoso e franco-arenoso e um Neossolo Flúvico com classes texturais: franco-arenoso, areia-franca e areia. Ao final do experimento os autores concluíram que o método utilizado forneceu, para todos os solos, valores aceitáveis e compatíveis com a literatura para a sorvidade (S), condutividade hidráulica saturada (K_s) e foi bem adaptado para modelar a infiltração tridimensional no campo. Foi a partir desse trabalho que no Brasil a metodologia Beerkan começou a ter mais destaque. Com os resultados, os autores evidenciaram uma relação entre os parâmetros e a textura do solo, no qual os solos mais arenosos possuíam resultados mais elevados de K_s e θ_s . Verificaram valores médios para K_s de $0,010 \text{ mm.s}^{-1}$ e θ_s de $0,37 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para solos franco-argilosos; K_s de $0,02 \text{ mm.s}^{-1}$ e θ_s de $0,40 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para solos franco arenosos e K_s de $0,03 \text{ mm.s}^{-1}$ e θ_s de $0,37 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para solos arenosos.

Bagarello & Lovino (2012) utilizaram a metodologia Beerkan na determinação da retenção de água para solos localizados na Sicília. Verificaram que o modelo, além de ser aplicável a maioria dos solos, se comportou bem na caracterização hidrodinâmica do solo, apresentando boa descrição dos dados.

Outra aplicabilidade da utilização do método Beerkan foi apresentada por Mubaraki (2009), que utilizou o modelo para identificar as alterações nas propriedades hidráulicas do solo provocadas pela irrigação por gotejamento. Deste estudo os autores analisaram a variação

temporal das propriedades durante o cultivo do milho (junho a setembro) entre dois tratamentos com diferentes intensidades de irrigação. Os ensaios de infiltração ocorreram antes do plantio e também após a colheita. Os autores concluíram que o método se mostrou eficiente para monitoramento da variabilidade espacial da condutividade hidráulica, porosidade e raio dos poros hidráulicamente ativos. O valor médio da condutividade hidráulica saturada (K_s) reduziu acentuadamente ao longo do tempo de irrigação e da profundidade do solo ($8,5 \cdot 10^{-3} \text{ mm.s}^{-1}$ para $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ mm.s}^{-1}$).

Silva (2009), utilizou o método Beerkan para caracterizar um Espodossolo hidromórfico e um Argissolo vermelho-amarelo da bacia experimental da Guaraira- PB. Os solos apresentaram bastante interferência antrópica e tem uso com plantações de cana de açúcar, abacaxi e remanescentes de Mata Atlântica. O estudo se mostrou robusto para caracterização do solo de textura arenosa, apresentando resultados satisfatórios tanto para condutividade hidráulica como para infiltração tridimensional.

Para verificar se o método Beerkan apresenta robustez ao caracterizar as propriedades hidráulicas do solo Xu et al. (2009), confrontou o BEST com o método de Diferenciação Linearizada (DL). A partir da análise dos parâmetros com os dois métodos os autores identificaram que o DL não foi capaz de identificar o estado do fluxo transitório nem de produzir uma boa estimativa das propriedades hidráulicas. O BEST apresentou resultados mais promissores, entretanto também foi observado que o modelo poderia apresentar algumas anomalias em determinar as propriedades hidráulicas do solo caso existissem poucos dados sob o fluxo transitório, alta compactação do solo e resto de vegetação

Catellini et al. (2018) avaliaram o BEST em relação aos três modelos de cálculo possíveis dentro do programa que são eles: Slope, Intercept e Steady. De acordo com os autores, o Slope é o cálculo do BEST que mais se aproxima com os resultados de retenção de água obtidos em laboratório. Foram analisados quatro tipos de solo com texturas variando entre arenosa e franco-arenosa e obtido uma média de $0,0245 \text{ mm.s}^{-1}$ de K_s para solos fraco-arenoso e $0,241 \text{ mm.s}^{-1}$ de K_s para solos arenosos, utilizando o BEST Slope.

3.6 Repelência do solo à água pela aplicação de efluente para irrigação

O acréscimo de matéria orgânica no solo devido a aplicação de efluente tratado ou não tratado e seus benefícios fertilizantes são amplamente difundidos pela literatura, porém o acréscimo de compostos orgânicos proveniente dessas águas pode provocar a hidrofobicidade

dos solos. De acordo com Abegurin et al. (2016), a repelência à água no solo ocorre devido a decomposição de compostos orgânicos que revestem as superfícies minerais ou os agregados do solo. A repelência também poderia ser provocada por resíduos como resto de ceras, óleos, resíduos de fungos e microrganismos presentes no solo devido a aplicação do efluente.

Quando o solo reduz sua afinidade com a água acontecem mudanças nas propriedades hídricas como redução da taxa de infiltração, redução da condutividade hidráulica do solo e caminhos preferenciais da água o que torna o solo repelente à água mais propício a erosão. O umedecimento não homogêneo do solo também é uma característica comum em solos hidrofóbicos. Esses efeitos podem prejudicar a estrutura do solo e limitar o crescimento radicular das culturas (RAHAV et al., 2017).

Wallach et al.(2005) indicaram que mesmo a repelência à água no solo sendo considerada uma característica transitória, influenciada principalmente pela matéria orgânica e pelo teor de água no solo, uma irrigação prolongada e sem devido manejo poderia tornar a hidrofobicidade um atributo persistente ao longo do tempo. Isso ocorre quando o incremento de substâncias hidrofóbicas é maior do que lixiviação ou degradação das mesmas.

O conteúdo de água presente no solo tem uma relação inversa com a repelência à água, quanto mais úmido estiver o solo menor o grau de repelência de acordo com as classes de classificação. Os trabalhos publicados amplamente em todo o mundo sobre repelência do solo à água usam as classes propostas por Bisdorn et al. (1993) que são elas: Classe I: não repelente à água (molhável); classe II: levemente repelente à água; classe III: fortemente repelente à água; classe IV: altamente repelente à água e classe V: extremamente repelente à água. As classes levam em consideração o tempo, em segundo, que uma gota de água leva para penetrar o solo.

A camada superficial dos solos tende a ter uma maior classificação quanto a repelência à água, por estarem mais expostos ao acúmulo de matéria orgânica e atuação dos microrganismos. Tem-se atrelado a isso o fato da faixa de 0-5 cm do solo está mais vulnerável aos processos de umedecimento e secagem. Diversos trabalhos identificam a camada superficial do solo irrigado com efluente tratado como fortemente a extremamente repelente à água e seu decréscimo de acordo com o aumento da profundidade do solo, chegando a ser considerados de levemente repelente a molhável em camadas mais profundas (WALLACH et al., 2005; HALLET et al., 2001; MATAIX-SOLERA & DOER, 2004)

Outros fatores que podem influenciar a hidrofobicidade são o teor e natureza da matéria orgânica, volume da aplicação do efluente e a presença de argila no solo (LEIGTON-BOYCE

et al., 2005; MATAIX-SOLERA et al, 2011; THWAITES et al., 2006). De acordo com Doer & Thomas (2000), solos com maior teor de argila apresentam-se menos repelentes do que os solos mais arenosos. Os solos arenosos têm uma maior facilidade em apresentar-se repelente à água por que as partículas de areia são mais facilmente revestidas pela matéria orgânica já que possuem uma área superficial específica mais baixa em comparação com os solos argilosos (WALLIS e HORNE, 1992; ARYE et al., 2011).

Leuther et al. (2019) avaliaram o comportamento de dois solos, um de textura arenosa e outro de textura argilosa sob irrigação com efluente tratado pelo período de seis anos. Os autores observaram que o solo arenoso apresentou mais áreas repelentes à água e maior dispersão dos dados do que o solo argiloso, sendo classificado de levemente a extremamente repelente à água e não foi observado redução da sua repelência em função da sazonalidade. Já o solo argiloso foi classificado como não repelente à água, porém após a estação seca 14% das amostras foram classificadas como fortemente repelente à água.

O volume de irrigação e tempo que o solo está exposto a esse tipo de prática interferem no teor de matéria orgânica no solo e conseqüentemente no aumento da repelência. Travis et al. (2010) não obtiveram diferença significativa após aplicação do efluente tratado em um solo arenoso por 40 dias consecutivos. Foi observado um aumento gradual do tempo de penetração da gota no solo, mas foram classificados como molhável (não repelente à água) durante todo o período de monitoramento. Os tempos de penetração da gota no solo foram iguais a 0,3 s; 0,3s e 0,4 s e 1,0 s. Enquanto que Zupanic et al. (2010) observaram mudanças significativas no tempo de penetração da gota no solo, em onze dias de aplicação do efluente, o tempo monitorado no ensaio de repelência à água foi de 89 s para 99 s em um solo arenoso, isso se deu devido à qualidade do efluente e ao teor de água no solo.

3.7 Influência do esgoto doméstico nos atributos físico-hídricos do solo

A reutilização do esgoto doméstico tratado para irrigação em áreas áridas e semiáridas, onde a evapotranspiração excede a precipitação em maior parte do ano é uma alternativa para a problemática de escassez da água doce na manutenção da agricultura local. Contudo, a água de reúso pode provocar alterações químicas e físicas no solo. Isso está relacionado ao teor de matéria orgânica, sólidos suspensos e sais que permanecem mesmo após o tratamento do efluente (BENHUR, 2004).

Os principais compostos presentes no efluente de esgoto doméstico e que estão relacionados a alteração das propriedades físico-hídricas do solo são os teores de sódio, os sais, matéria orgânica e presença de sólidos suspensos. Enquanto o sódio pode provocar a dispersão das argilas, a matéria orgânica tende a promover a agregação do solo. Esses fatores podem alterar a porosidade e estrutura dos agregados do solo, o que tem efeito na taxa de infiltração e na capacidade de retenção de água (CAPPOLA, 2004; NADAV et al., 2013).

Com o uso de águas residuais tratadas para irrigação tanto o armazenamento quanto o movimento da água no solo podem ser modificados devido a alteração na condutividade hidráulica e da taxa de infiltração do solo. Gharaibeh et al. (2007) analisaram as mudanças nas propriedades hídricas de um vertissolo devido a irrigação com águas residuais. Nesse estudo, os autores identificaram que nos primeiros dois anos de uso de água de esgoto para irrigação houve uma redução da taxa de infiltração e essa foi associada ao aumento de aproximadamente 4% na percentagem de sódio trocável. Segundo Levy (2011) e Lado & Bem-Hur (2009), a redução da condutividade hidráulica e da taxa de irrigação também podem ocorrer devido ao entupimento dos poros, porém nesse estudo apenas os solos argilosos tiveram alteração, já os solos arenosos não sofreram alterações devido ao maior diâmetro dos seus poros.

A irrigação com águas residuais pode intensificar o processo de salinização e sodificação do solo que já são mais intensos em áreas áridas e semiáridas devido as condições climáticas locais, alta evapotranspiração e composição química dos solos. Em geral as águas de efluente doméstico apresentam maior teor de sais quando comparadas a água doce. O aumento do teor de sódio no solo, como também, a redução do cálcio devido a lixiviação, podem provocar a dispersão da argila. De acordo com Spera et al. (2008), essa dispersão de argila e o entupimento dos poros ocorrem principalmente nos primeiros centímetros do perfil do solo pois é nessa primeira camada que os íons de sódio tendem a se acumular.

Para identificar o aumento do sódio na fase solúvel do solo em relação aos demais cátions utiliza-se o cálculo da RAS (razão de adsorção de sódio) que é a relação entre as concentrações de Na^+ e dos íons Ca^{2+} e Mg^{2+} , no extrato de saturação do solo, determinada pela equação 14.

$$RAS = \frac{\text{Na}^+}{\left[\frac{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})}{2} \right]^{0,5}}, \text{ mmol.kg}^{-1} \quad (14)$$

Com o aumento da razão de adsorção de sódio, a camada superficial do solo é a que mais apresenta o efeito de crostas, o que reduz a infiltração e em solos arenosos pode provocar perda de solo e aumento do escoamento superficial (LADO et al., 2005; GONÇALVES, 2010).

Além disso, Halliwell et al. (2001) demonstraram que os solos irrigados com água de esgoto doméstico apresentavam repelência à água devido a presença de compostos hidrofóbicos acarretando na redução da condutividade hidráulica e na infiltração de água no solo. Na repelência do solo, a água ocasionada por hidrocarbonetos alifáticos não polares e substâncias polares com estrutura anfifílica causam uma desigualdade na taxa de infiltração do solo e cria fluxos preferenciais da água no solo. Em um estudo para identificar a repelência causada por águas de reúso em um luvisolo de textura franco arenosa Zhipeng et al. (2019) demonstraram que a camada superficial do solo (0 a 5 cm) após 4 a 6 anos de irrigação apresentava alto grau de repelência de acordo com a classificação de DeBano (2000); Bisdorn et al. (1993).

Devido ao incremento da matéria orgânica no solo proveniente da irrigação com águas residuais há uma melhor estruturação dos agregados como também uma redução na densidade da partícula, densidade do solo e aumento na porosidade (MOJIRI, 2011). Porém, um estudo realizado por Mollahoseini (2013), nas regiões semiáridas do Irã, identificou um aumento na densidade do solo com o uso de irrigação com esgoto tratado. Segundo o autor, a compactação do solo estaria relacionado a quantidade de sólidos suspensos provenientes das águas residuais.

4. MATERIAL E MÉTODOS

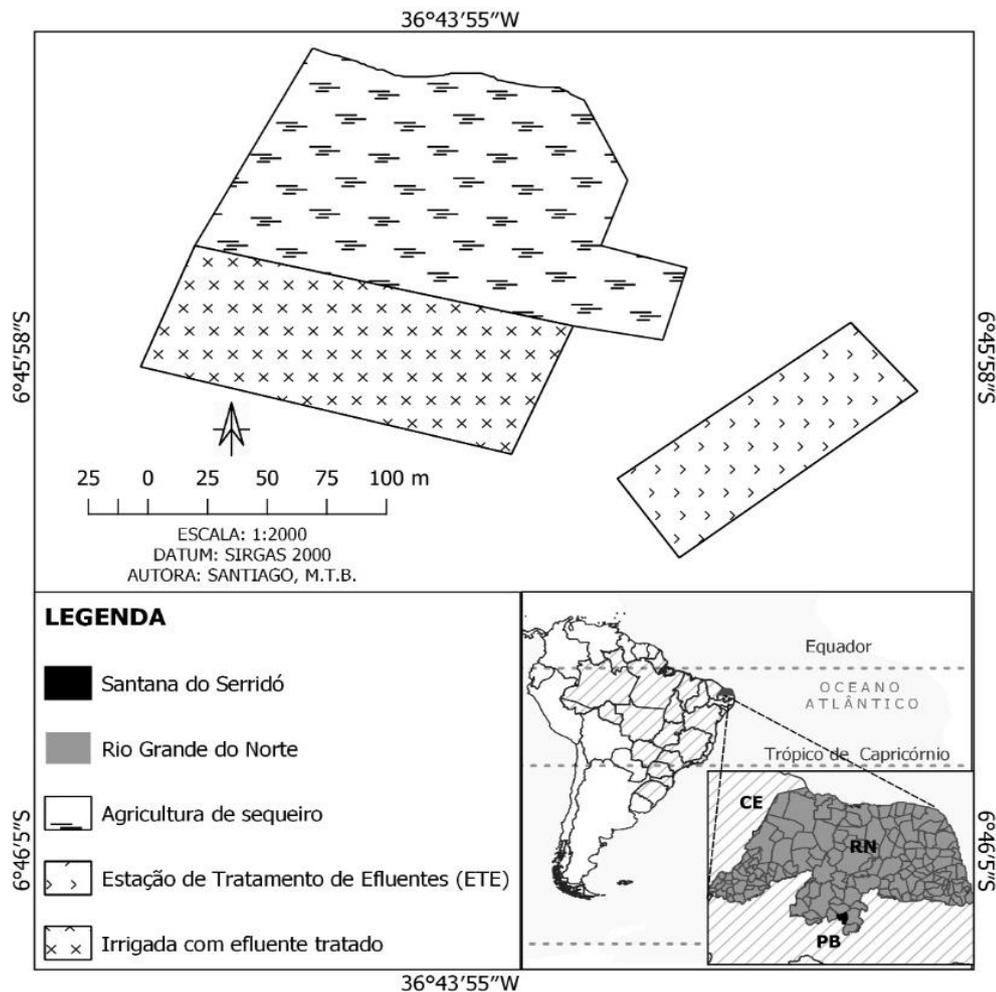
4.1 Área de estudo

A área de estudo onde foram realizados os experimentos está localizada no município de Santana do Seridó-RN, cujas coordenadas geográficas são: 6° 45'58'' de latitude Sul, 36° 44'0'' de longitude Oeste e 304 metros de altitude (Figura 2). Santana do Seridó está situado na área centro-Sul do estado do Rio Grande do Norte, inserido na unidade geoambiental do Planalto da Borborema, de relevo suavemente ondulado. O município possui área de 188,4 km² com 2.688 habitantes e densidade demográfica de 13,41hab/km², segundo o censo do IBGE em 2016.

O clima da região é classificado como Bsh – clima quente de estepe segundo a Köppen e Geiger, caracterizado pelo bioma Caatinga. A pluviosidade anual é de 559 mm, temperatura média anual de 25,5°C. O período chuvoso se concentra nos meses de março, abril e maio, sendo o mês de março o de maior precipitação, cerca de 174mm. Durante o período seco, o mês de setembro apresenta apenas 1mm/mês.

Duas unidades experimentais foram selecionadas para realizar os testes de infiltração e as coletas de solo. Na Figura 2 está representado o município de Santana do Seridó como também a área experimental que tem como cultivo, nos últimos seis anos, a palma forrageira irrigada por gotejamento com água de esgoto tratada, e a área de sequeiro.

Figura 2. Localização das unidades experimentais onde foram realizados os testes de infiltração e as coletas de solo.



Fonte: Autor.

A área de estudo faz parte de um projeto da prefeitura local, nomeado Palmas para Santana, no qual o esgoto doméstico produzido pelos habitantes da cidade é tratado e utilizado para a irrigação de palma forrageira (Figura 3). A palma é utilizada para alimento do gado e banco de estoque, está cultivada em uma área de 1 ha e recebe uma lâmina de 1,5 litros/m² (1,5 mm por semana). O município apresenta, atualmente, 96% de todo seu território saneado, no qual todo o efluente gerado é coletado e conduzido para Estação de Tratamento de Efluente (ETE) local, que trata aproximadamente 270 mil litros de esgoto diariamente por meio de processos biológicos e de filtragem (Figura 4).

Figura 3. Plantio de palma forrageira irrigada por gotejamento com esgoto doméstico tratado.



Fonte: Autor.

Figura 4. Localização do município de Santana do Seridó e das lagoas de estabilização da Estação de Tratamento de Efluente.



Fonte: Autor.

A caracterização química do solo das duas áreas e da água do efluente tratado para irrigação, no momento da coleta do solo, está representada na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização química do efluente tratado para irrigação e dos solos com reúso e testemunha.

Elements	Treated wastewater	Irrigated soil	No-irrigated soil
N (g.L ⁻¹)	6,70	-	-
P (mg.kg ⁻¹)	4,10	18,06	9,68
K (mg.L ⁻¹)	47,50	75,00	112,00
Na (mg.L ⁻¹)	250,00	141,00	20,00
Ca (mg.L ⁻¹)	41,85	276,00	410,00
Mg (mg.L ⁻¹)	26,88	114,00	101,00
Sólidos Totais (mg.L ⁻¹)	930,67	-	-
Sólidos Fixos (mg.L ⁻¹)	720,00	-	-
Sólidos Voláteis (mg.L ⁻¹)	210,67	-	-
pH	-	7,20	7,00
RAS (mmol.kg ⁻¹)	-	2,60	0,30
COT (g.kg ⁻¹)	-	3,77	3,30
MO (g.kg ⁻¹)	-	6,5	5,69

C- Carbono; N- Nitrogênio; P-fósforo; K-Potássio; Na- sódio; Ca- Cálcio; Mg- Magnésio; COT- Carbono Orgânico Total; RAS- Razão de Absorção de Sódio; MO- Matéria Orgânica.

O solo dessa região foi classificado como Planossolo de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Figura 5). Segundo a EMBRAPA (2013), os Planossolos necessitam muitas vezes de correção química para prática da agricultura. São solos rasos, pouco desenvolvidos, de baixa permeabilidade e suscetíveis a erosão. Apresentam horizonte B textural com acumulação de argila em alguns pontos, podendo ocorrer mudanças texturais abruptas entre o horizonte A e B, dificultando a drenagem do solo. Apresentam alta saturação por sódio tendo característica de solos sódicos, o que limita o desenvolvimento de culturas. São solos de fertilidade baixa a alta de cores acinzentadas ou escurecidas e geralmente apresentam baixo teor de matéria orgânica e deficiência de fósforo.

Figura 5. Caracterização do Planossolo no município de Santana do Seridó-RN.

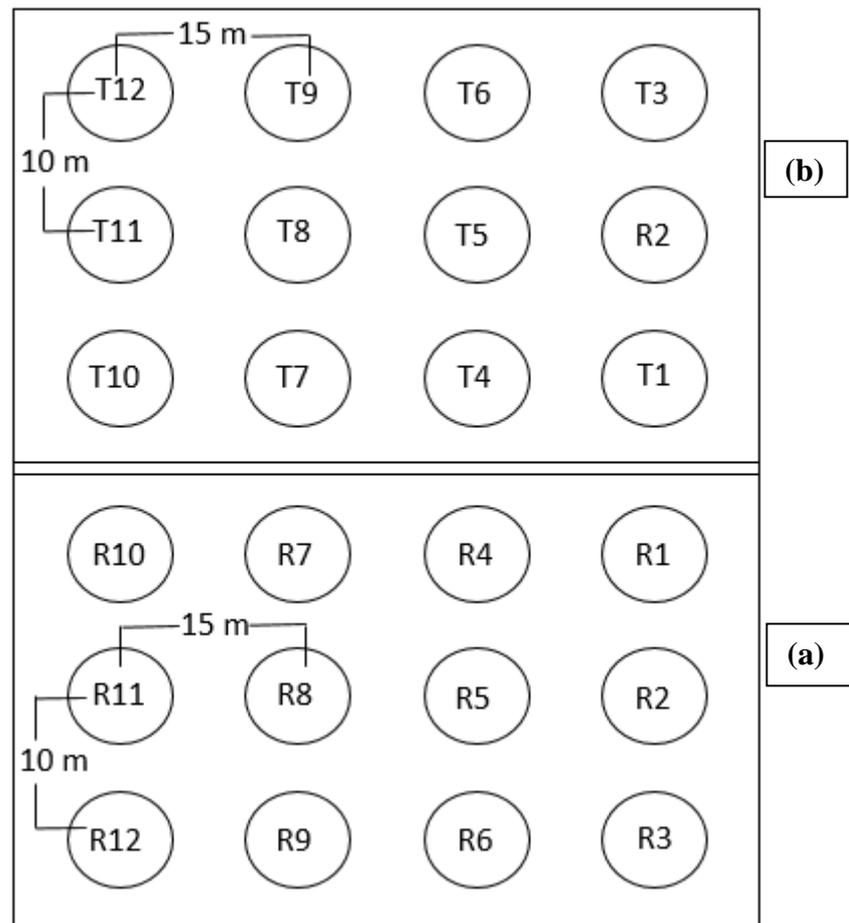


Fonte: Autor.

4.2 Procedimento experimental para o ensaio de infiltração

Os ensaios de infiltração e as coletas de solo foram realizadas numa malha de 15 metros de distância entre colunas e 10 metros entre as linhas, totalizando 12 repetições em cada parcela experimental (Figura 6).

Figura 6. Representação da malha experimental para as duas parcelas. Área (a) reúso e área (b) testemunho.



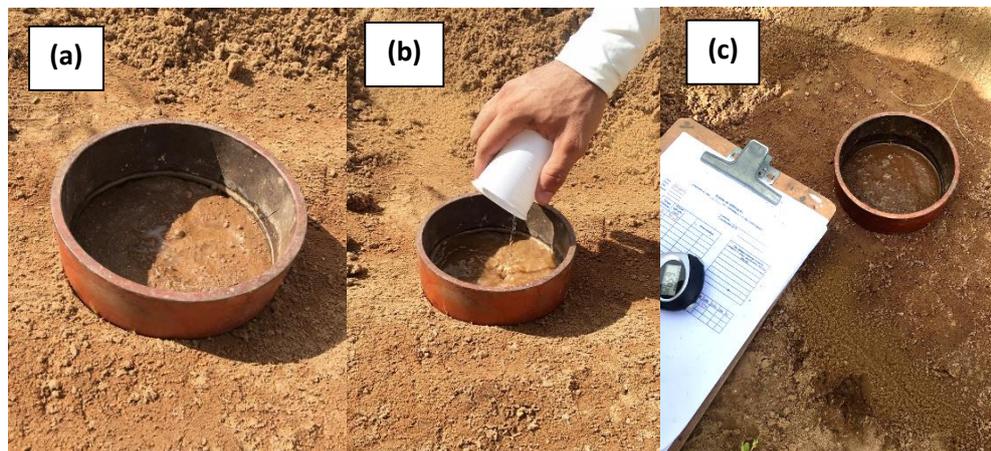
Fonte: Autor.

O ensaio de infiltração foi realizado de acordo com a metodologia de Beerkan. Para isso, antes de iniciar o experimento, o terreno foi limpo cuidadosamente para não haver modificação da estrutura do solo e para evitar a influência da vegetação no processo de infiltração. Um anel simples de 15 cm de diâmetro foi cravado no solo à uma profundidade de aproximadamente 1 cm, para que se mantivesse o fluxo tridimensional axissimétrico na superfície do solo, mas evitando perdas laterais de água (Figura 7). Foi coletada uma amostra de solo deformada (0 a

5 cm de profundidade) antes de iniciar a aplicação da lâmina d'água para obter a umidade gravimétrica inicial (θ_0). Próximo ao local do ensaio, outra amostra de solo deformada foi coletada para obtenção da curva de distribuição das partículas $F(D)$.

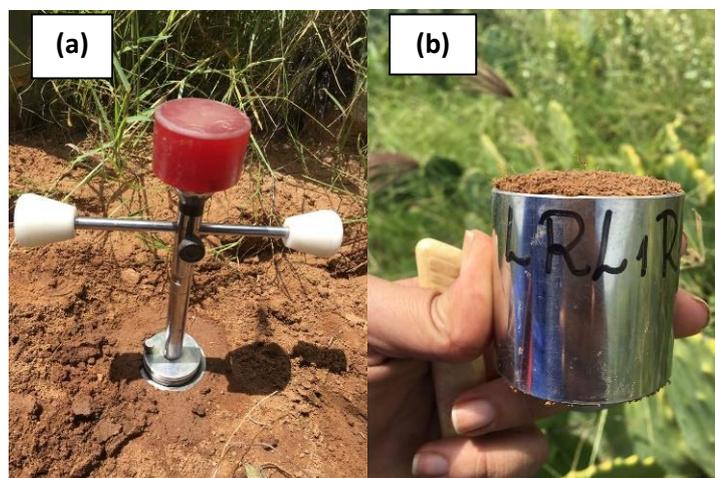
O teste de infiltração iniciou com a aplicação contínua de 70 ml de água, vertidos no cilindro, e a anotação do tempo em que esse volume levava para infiltrar completamente (Figura 7). Esse procedimento foi repetido (de 8 a 20 volumes de água) até que a velocidade de infiltração se tornou constante. Ao final do teste de infiltração uma amostra de solo deformada foi coletada, dentro do perímetro do cilindro, para a determinação da umidade gravimétrica final (θ_f) e, com o auxílio do amostrador de Uhland (Figura 8), uma amostra de solo úmido indeformada foi coletada próxima ao infiltrômetro para determinar a densidade do solo (ρ_s).

Figura 7. Anel de 15 cm de diâmetro cravado no solo a 1 cm de profundidade (a); Volume de água 70ml convertido no anel (b) começando assim a cronometrar o ensaio e anotar os valores na planilha (c).



Fonte: Autor.

Figura 8. Amostrador de Uhland (a) e amostra indeformada do solo para determinação da densidade do solo (b).



Fonte: Autor.

Os dados obtidos em campo juntamente com os parâmetros analisados em laboratório (umidade gravimétrica e granulometria) foram utilizados na determinação dos parâmetros hidrodinâmicos K_s e S . O programa BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters Through Infiltration Experiments) foi rodado no software Scilab versão 6.0.0

4.3 Procedimento experimental para o ensaio de granulometria, densidade do solo e densidade da partícula

Os dados de granulometria foram obtidos de acordo com a metodologia da ABNT (1984), na qual as frações mais finas do solo (silte e argila) são determinadas por sedimentação e as partículas mais grosseiras (areia) por peneiramento.

As amostras deformadas de solo coletadas em cada ponto foram secas ao ar e posteriormente peneiradas em malha de 2,0 mm. Para determinar a umidade w das amostras do solo, antes do ensaio de granulometria, foi realizado em triplicata o seguinte procedimento para cada amostra: 30 g de solo foi levado a estufa a 70 °C até obter peso constante e a umidade do solo foi determinada por diferença de peso em gramas. Em seguida, 70 g de solo seco ao ar e peneirado em malha de 2,0 mm foi transferido para um erlenmeyer, no qual foi acrescentado 125 ml de uma solução de hexametáfosfato de sódio e mantido em repouso durante 12 horas. Para essa solução foi utilizado 90,14g de Hexametáfosfato de sódio diluído em 500 ml de água destilada, logo em seguida, a mistura foi transferida para um balão volumétrico previamente aferido e completado com água destilada até completar o volume de dois litros. Passada às 12 horas da mistura, 70g de solo mais 125 ml da solução de hexametáfosfato de sódio, os erlenmeyer foram levados ao agitador de hélice por 15 minutos (Figura 9).

Figura 9. Erlenmeyer com solução de Hexametafosfato de sódio e solo no agitador de hélice.



Fonte: Autor.

Esse conteúdo, após agitação, foi transferido para uma proveta e adicionado cuidadosamente água destilada até completar o volume de um litro. Cada amostra foi tampada e agitada, vigorosamente, por vinte vezes antes de começar as leituras com densímetro. Os tempos das leituras foram: 30", 1', 2', 4', 8', 15', 30', 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, 24 h. Com a ajuda de um termômetro foi aferida a temperatura em cada tempo de leitura. Após as leituras, cada amostra do solo foi lavada em uma peneira de 0,053 mm e o material retido na peneira foi levado a estufa a 100 °C por 24 h para secagem e fracionamento. Após secagem em estufa, as amostras passaram por cinco peneiras com as seguintes malhas: 1,0 mm; 0,5 mm; 0,25 mm; 0,106 mm e 0,053 mm. O material retido em cada peneira foi pesado para construção da curva granulométrica (Figura 10).

Neste estudo, foram realizados vinte e quatro ensaios granulométricos, um para cada ponto, e todas as frações (argila, silte, areia fina, areia média e areia grossa) foram consideradas na construção da curva de distribuição do tamanho das partículas ou curva granulométrica $F(D)$, com o intuito de obter uma maior precisão.

Figura 10. Determinação da distribuição granulométrica do solo por sedimentação (a) e por peneiramento (b).



Fonte: Autor.

Para a análise de massa específica da partícula (ρ_p) e massa específica do solo (ρ_s), foram coletadas doze amostras em cada área experimental. Ambas análises foram determinadas de acordo com o manual de métodos de análise de solos (EMBRAPA, 2017). A densidade de partícula foi realizada de acordo com o método do balão volumétrico, que consiste em duas etapas: a primeira foi a obtenção da massa da amostra por pesagem após secagem em estufa a 105°C até atingir peso constante, e a segunda etapa consistiu na determinação do seu volume por meio da diferença entre o volume de um líquido necessário para encher um volume calibrado vazio e o volume do líquido necessário para completar o volume do recipiente contendo a amostra seca. A estimativa da massa específica da partícula foi obtida pela Equação 15.

$$D_p = \frac{m_a}{(V_t - V_u)} \quad (15)$$

Sendo, D_p : densidade de partículas [M.L^{-3}]; m_a : massa da amostra seca em estufa [M]; V_t : volume total aferido do balão [L^3]; V_u : Volume utilizado para completar o balão volumétrico com a amostra [L^3].

Já a análise de densidade do solo foi determinada pelo método do cilindro volumétrico, no qual se obtém a massa do solo por pesagem, seco em estufa a 105°C . O volume foi

determinado pela coleta da amostra em estrutura indeformada por meio de um cilindro de volume interno conhecido. O cálculo da densidade do solo está representado na Equação 16.

$$D_s = \frac{m_a}{V} \quad (16)$$

Sendo, D_s : densidade do solo [$M.L^{-3}$]; m_a : massa da amostra de solo seco; V : volume do cilindro [L^3].

4.4 Caracterização da repelência à água no solo.

A repelência à água no solo foi determinada de acordo com a metodologia de Deban (2000), na qual é medido o tempo que uma gota de água leva para penetrar na superfície do solo. Foram coletadas 24 amostras de solo indeformadas, 12 para cada área de estudo na superfície do solo (0 – 5 cm). As amostras foram coletadas anteriormente ao ensaio de infiltração de acordo com a metodologia proposta e com o auxílio de um amostrador de Uhland. Os cilindros onde as amostras foram coletadas eram de aço inoxidável de 5 cm de diâmetro interno e 5 cm de altura (Figura 11). As folhas secas e resíduos vegetais foram cuidadosamente retirados com a mão para não interferir no processo de infiltração da gota nem na estrutura do solo. Após coleta os cilindros foram plastificados com papel bolha e acondicionados em isopor.

Figura 11. Coleta de amostra indeformada de solo, com amostrador de Uhland, para teste de repelência à água no solo.



Fonte: Autor.

As amostras foram levadas a estufa por 48h a 55 °C com objetivo de eliminar o efeito da umidade no ensaio de repelência, seguindo as orientações de Hubbell (1988) de que o teor de água no solo pode influenciar os dados de medição da repelência à água no solo.

O ensaio consistiu basicamente da aplicação de três gotas de 50 µL de água destilada colocadas na superfície do solo e contabilizado o tempo decorrido para absorção da gota (DEBANO, 2000; LEUTHER, 2018; ZHIPENG, 2019). Após o ensaio foi realizada a média do tempo de penetração das três gotas e determinado o grau de repelência de acordo com as classes de classificação. O ensaio foi realizado em profundidade na camada superficial do solo então foi repetido o procedimento anteriormente mencionado em cada 1 cm da amostra, totalizando cinco ensaios para cada amostra de solo. Um disco de 4,9 cm de diâmetro e 1cm de espessura foi inserido no fundo do cilindro para empurrar a amostra de solo para cima (Figura 12). Após o ensaio na camada de 1 cm, a mesma era removida com auxílio de uma faca, acondicionada para realização do teste de matéria orgânica e o disco era empurrado para realizar o teste da próxima camada do solo.

Figura 12. Ensaio de teste de repelência à água em cada 1 cm da amostra de solo.



Fonte: Autor.

Foram utilizadas as cinco classes comuns de classificação (Bisdorn et al., 1993): Classe I, molhável (tempo de penetração da gota < 5s); classe II, levemente repelente à água (5s ≤ tempo de penetração da gota < 60s); classe III, fortemente repelente à água (60s ≤ tempo de penetração da gota < 600s); classe IV, altamente repelente à água (600s ≤ tempo de penetração da gota < 3600s); Classe V, extremamente repelente à água (tempo de penetração da gota > 3600s).

4.4.1 Matéria Orgânica do solo

A matéria orgânica do solo foi calculada para cada 1 cm de solo, ou seja, cinco para cada ponto coletado totalizando 120 amostras. Para quantificar os teores de matéria orgânica no solo foi realizado o ensaio de determinação do teor de carbono orgânico total (COT) de cada amostra e utilizada a metodologia por oxidação úmida (YEOMANS & BREMNER, 1988). Nesse método foi necessário oxidar o Carbono presente na amostra de solo com o dicromato de potássio e com o ácido sulfúrico. Para otimização do processo e para assegurar que aproximadamente 100% do Carbono presente fosse oxidado foi utilizado uma fonte externa de calor.

Foi pesado 0,5 gramas de solo de cada amostra e depositados em tubos de digestão, devidamente identificados. Foi acrescido 5 mL da solução de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$ $0,167 \text{ mol L}^{-1}$) e 7,5 mL de ácido Sulfúrico (H_2SO_4) concentrado. Os tubos de digestão foram levados ao bloco digestor, previamente aquecido, no qual permaneceram por 30 minutos a uma temperatura de 170° C (Figura 13).

Figura 13. Pesagem de 0,5 gramas de cada amostra de solo e tubos de digestão pré-aquecimento.



Fonte: Autor.

Após os 30 minutos as amostras foram retiradas do bloco digestor e foram preparadas para a titulação. Utilizou-se uma solução indicadora de ferroin e as amostras foram tituladas com a solução de sulfato ferroso amoniacal ($H_3FeN_2O_8S_2 \cdot 6H_2O$ $0,2 \text{ mol/L}$). O ponto de viragem da titulação foi nítido quando a solução passou de verde para violeta escuro (Figura 14).

Figura 14. Ponto de viragem da titulação de verde para violeta escuro.



Fonte: Autor.

Nessa metodologia é necessário a preparação de 6 testes brancos para controle (5,0 mL de $K_2Cr_2O_7$ $0,167 \text{ mol.L}^{-1}$ + 7,5 mL de H_2SO_4 concentrado). Três desses tubos brancos de controle foram levados para digestão junto com as demais amostras e três dos tubos brancos permaneceram sem aquecimento, em temperatura ambiente. Faz-se necessário o teste branco não aquecido para o cálculo do total de dicromato consumido no aquecimento da amostra.

O teor de carbono orgânico foi calculado com base no volume da solução de sulfato ferroso amoniacal $0,2 \text{ mol.L}^{-1}$ gasto na titulação da amostra do branco aquecido (V_{ba}) e do branco não aquecido (V_{bn}), conforme as equações 17 e 18.

$$A = \frac{(V_{ba} - V_{am}) \cdot (V_{bn} - V_{ba})}{V_{bn}} + (V_{ba} - V_{am}) \quad (17)$$

$$CO = \frac{(A) \cdot (0,2) \cdot (3) \cdot (100)}{P} \quad (18)$$

sendo A: Volume de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação [L^3]; V_{ba} : Volume de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação do branco controle com aquecimento [L^3]; V_{bn} : Volume de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação do branco controle sem aquecimento [mL]; V_{am} : Volume de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação da amostra [L^3]; CO: Teor de Carbono Orgânico [dag.Kg $^{-1}$]; 0,2 é a molaridade do Sulfato Ferroso [mol. L^{-1}]; 3 é o peso equivalente

do carbono; 100 é o fator de conversão de unidade [$\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ para $\text{dag} \cdot \text{kg}^{-1}$] e P: peso da amostra [M].

A matéria orgânica do solo foi calculada a partir da Teor de Carbono Orgânico Total e do fator de correção de van Bemmelen, no qual multiplica-se o valor de COT por 1,724 (JIMÉNEZ & GARCIA, 1992).

4.5 BEST- Algoritmo e análise dos dados

4.5.1 Determinação dos parâmetros de forma (m, n e η)

Assumindo que há similaridade de forma entre a curva de distribuição do tamanho das partículas $F(D)$, obtida a partir do ensaio de granulometria, e da curva de retenção de água no solo $\theta(h)$ foi utilizada a seguinte equação para expressar $F(D)$ (HAVERKAMP & PARLANGE, 1986):

$$F(D) = \left[1 + \left(\frac{D_g}{D} \right)^N \right]^{-M} \quad (19)$$

Com $M = 1 - \frac{2}{N}$

Sendo $F(D)$ a distribuição do tamanho das partículas; D o diâmetro da partícula de solo [L]; D_g o parâmetro de escala do tamanho das partículas [L]; M e N os parâmetros de forma da curva de distribuição do tamanho das partículas.

Para obter os parâmetros de forma da curva de retenção (m , n) se fez necessário determinar o índice de forma do meio (p_m) que pode ser estimado a partir dos parâmetros M e N (ZATARÁIN et al., 2003):

$$p_m = \frac{MN}{1 + M} (1 + k_f)^{-1} \quad (20)$$

Sendo k_f um coeficiente definido por Fuentes et al. (1998):

$$k_f = \frac{2s - 1}{2s(1 - s)} (1 + k_f)^{-1} \quad (21)$$

Sendo s a dimensão fractal relativa.

A partir do índice de forma do meio p_m foi possível obter os parâmetros de forma da curva de retenção (m, n):

$$m = \frac{1}{p_m} (\sqrt{1 + p_m^2} - 1) \quad (20)$$

$$n = \frac{2}{1 - m} \quad (23)$$

A dependência de $s = D_f/E$, na qual D_f é a dimensão fractal do solo e $E = 3$ a dimensão de Euclides) com respeito à porosidade total do solo (ϕ) foi definida por (Fuentes, 1992):

$$(1 - \phi)^s + \phi^{2s} = 1 \quad \text{com } \frac{1}{2} < s < 1 \quad (24)$$

Para equação da curva de condutividade hidráulica de Brooks & Corey (1964), o seu parâmetro de forma, η , foi expresso como função do produto dos parâmetros de forma da curva de retenção e do fator de tortuosidade (p):

$$\eta = \frac{2}{mn} + 2 + p \quad (25)$$

sendo $p = 1$ para o modelo de Burdine (1953).

4.5.2 Determinação dos parâmetros de normalização (θ_s, K_s e h_g)

O parâmetro de normalização, θ_s , foi determinado a partir da umidade gravimétrica saturada e da densidade do solo (p_s). Ambos foram calculados em laboratório a partir das amostras de solo coletadas em campo. Os parâmetros de normalização K_s e h_g foram obtidos a partir da soma dos quadrados da diferença entre as lâminas de água infiltradas observadas e das lâminas de água calculadas, ou seja, através da minimização de $I(S, K_s)$. A lâmina de água

infiltrada (I) foi calculada pela equação de Haverkamp et al. (1994) que é válida para tempos de infiltração curtos e médios:

$$I(S, K_s) = \sum_{i=1}^{N_{obs}} (I_i - S\sqrt{t_i} + aS^2t_i + b_2K_s t_i)^2 \quad (26)$$

com,

$$a = \frac{\gamma}{r\Delta\theta} \text{ e } b_2 = \left(\frac{\theta_0}{\theta_s}\right)^n + \frac{2-\beta}{3} \left(1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s}\right)^n\right) \quad (27)$$

Sendo S a sorvidade [L. T^{-1/2}]; K_s a condutividade saturada do solo [L.T⁻¹]; θ_s a umidade volumétrica saturada [L³.L⁻³]; r o raio do cilindro [L]; γ igual a 0,75 e β igual a 0,6.

Para minimização de I (S, K_s) foi utilizado o algoritmo de Marquardt (1963) e o desempenho dos ajustes foi analisado pelos valores correspondentes ao erro quadrático médio (EQM):

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^j [I_{exp}(t_i) - I(t_i)]^2}{\sum_{i=1}^j [I_{exp}(t_i)]^2}} \quad (28)$$

Após determinação de θ_s e K_s, o parâmetro h_g foi obtido pela equação proposta por Lassabatère et al. (2006):

$$h_g = \frac{S^2}{c_p(\theta_s - \theta_0) \left[1 - \frac{\theta^n}{\theta_s^n}\right] K_s} \quad (29)$$

Na qual c_p é um parâmetro que depende apenas dos parâmetros de forma n, m e η dos modelos de Condappa et al., (2002); Lassabatère et al., (2006).

$$c_p = \pi \left(1 + \frac{1}{n}\right) \left[\frac{\pi(n\eta + \frac{1}{n})}{\pi(n\eta)} + \frac{\pi(n\eta + m\frac{1}{n})}{\pi(n\eta + m)} \right] \quad (30)$$

4.5.3 Escalas Características

Alguns fatores, durante o processo de infiltração tridimensional, podem afetar o fluxo de água no solo, dentre eles: geometria da fonte de água, capilaridade e a gravidade. Esses fatores são definidos pelas escalas de comprimento capilar, λ_c [L] e o raio característico dos poros hidraulicamente ativos, λ_m [L] determinados respectivamente pelas equações:

$$\lambda_c = \frac{\delta S^2}{(\theta_s - \theta_0)K_s} \quad (\text{White \& Sully, 1987}) \quad (31)$$

$$\lambda_m = \frac{\sigma}{\rho_a g \lambda_c} \quad (\text{Philip, 1987}) \quad (32)$$

sendo σ a tensão superficial da água [0,0719 N.m⁻¹]; ρ_a a massa específica da água [10³ Kg.m⁻³]; g a aceleração da gravidade [9,81 m.s⁻²] e δ um parâmetro de forma da difusividade que foi considerado igual a 0,55 segundo White & Sully (1987).

A escala de comprimento capilar (Equação 31) representa a importância relativa das forças capilares em relação à gravidade, quando a água é transmitida de uma fonte através do solo, com umidade inicial θ_0 . O raio característico de poros (Equação 32) define a dimensão média dos poros que participam do processo de infiltração submetida à pressão aplicada h ; quanto maior for o raio característico, λ_m , maior é o efeito da gravidade em comparação ao da capilaridade.

A concentração de raio característico de poros λ_m , C_{λ_m} (número de poros.m⁻²), foi estimada usando-se a lei de Poiseuille para fluxo em um tubo capilar:

$$C_{\lambda_m} = \frac{8\mu K}{\rho_a g \pi \lambda_m^4} \quad (\text{Souza et al., 2007}) \quad (33)$$

Sendo μ a viscosidade dinâmica da água [0,00089 kg. m⁻¹.s⁻¹].

4.6 Análise estatística

Os resultados experimentais obtidos foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade dos dados ao nível de significância de 5%. Posteriormente foi realizada à análise de variância (ANOVA, 5%) seguida de teste para comparação de médias (Tukey, 5%). A estatística foi realizada no Statistical Software for Excel- XLSTAT versão 2019.3.1. Os

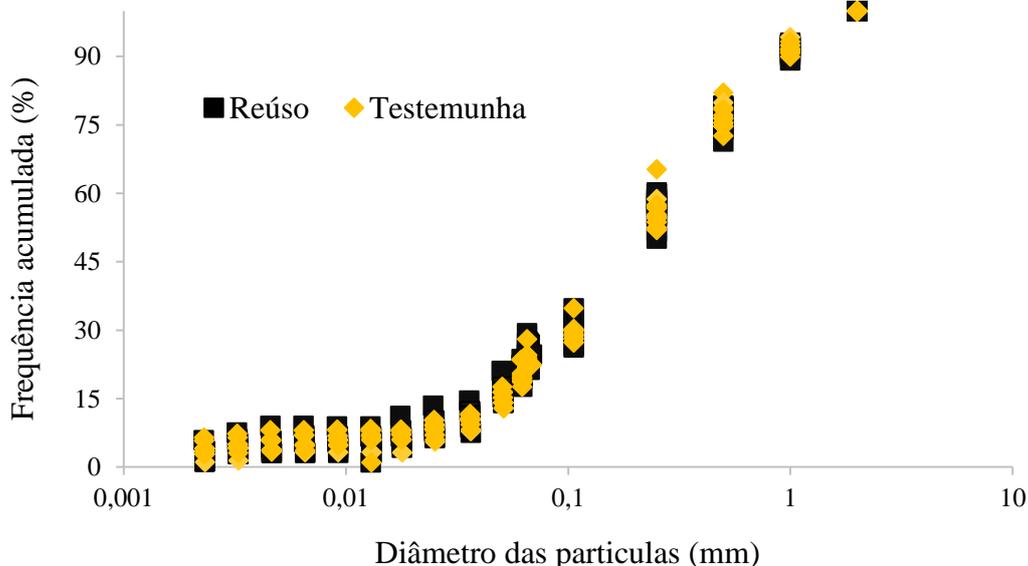
coeficientes de variação (CV) para os parâmetros analisados nesse estudo foram comparados com a classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980) que sugere os limites de coeficiente de variação (CV) para propriedades físicas do solo, avaliando assim o grau de variabilidade dos parâmetros, que indicam os limites de $CV < 12\%$, $12 \leq CV \leq 52\%$ e $CV \geq 52\%$ para as propriedades de baixa, média e alta variabilidade, respectivamente. Os gráficos Boxplot foram desenvolvidos no programa de estatística R-3.6.0.

5. RESULTADO E DISCUSSÃO

5.1 Comportamento das camadas texturais do solo

As curvas granulométricas da camada superficial dos solos estudados estão representadas na Figura 15. É possível observar semelhança de comportamento, isso porque os solos das duas áreas foram classificados na mesma classe textural, areia franca. Os valores médios obtidos para argila, silte e areia foram respectivamente $2,58 \text{ dag.kg}^{-1}$; $18,06 \text{ dag.kg}^{-1}$ e $79,36 \text{ dag.kg}^{-1}$ para área com reúso e $3,75 \text{ dag.kg}^{-1}$; $15,83 \text{ dag.kg}^{-1}$; $80,41 \text{ dag.kg}^{-1}$ para área testemunha.

Figura 15. Curvas granulométricas em solo sob irrigação com reúso e solo testemunha.



Fonte: Autor.

Os parâmetros estatísticos da textura do solo estão representados na Tabela 3. Analisando o coeficiente de variação e comparando-os com os limites de CV, recomendado por

Warrick e Nielsen (1980) para propriedades físicas do solo, é possível constatar um comportamento semelhante na variabilidade entre as duas áreas analisadas, demonstrando a homogeneidade na distribuição dos dados. Os solos apresentaram baixa variabilidade para fração silte e média para fração areia. Já a fração argila apresentou média variabilidade na área testemunha e alta para área irrigada com efluente doméstico, ou seja, foi a fração argila na área irrigada com esgoto tratado que apresentou a maior dispersão entre os dados amostrados.

Tabela 3. Estatística das frações granulométricas

Parâmetros estatísticos	Reúso			Testemunha		
	Argila	Silte	Areia	Argila	Silte	Areia
	----- dag.kg ⁻¹ -----			----- dag.kg ⁻¹ -----		
Média (μ)	2,58	18,06	79,36	3,75	15,83	80,41
Mediana (Med)	2,36	18,75	79,33	3,76	15,45	80,52
Desvio- Padrão (σ)	1,46	1,85	1,57	1,39	1,75	1,45
Variância (σ^2)	2,13	3,41	2,47	1,93	3,07	2,12
Coef. de Variação(%)	57	10	20	37	11	20
Assimetria (C_s)	1,02	-1,02	-0,05	0,27	1,24	-1,85
Valor Máximo ($V_{\text{máx}}$)	5,93	20,13	82,40	6,44	20,10	82,41
Valor Mínimo ($V_{\text{mín}}$)	1,19	14,17	76,32	1,08	13,20	76,47
Número de observações (N)	12	12	12	12	12	12
Shapiro-Wilk	0,31	0,14	1,00	0,36	0,15	0,18

Distribuição normal a 95% de probabilidade

O elevado teor de areia na camada superficial do solo é uma característica comum dos Planossolos em região semiárida (OLIVEIRA, 2009; REBOUÇAS et al., 2016). França Neto (2018b) avaliou as características físicas de um Planossolo em área de caatinga e encontrou aproximadamente 62% de areia na camada superficial dos solos, baixa variabilidade para as frações de areia e silte e média variabilidade para fração de argila.

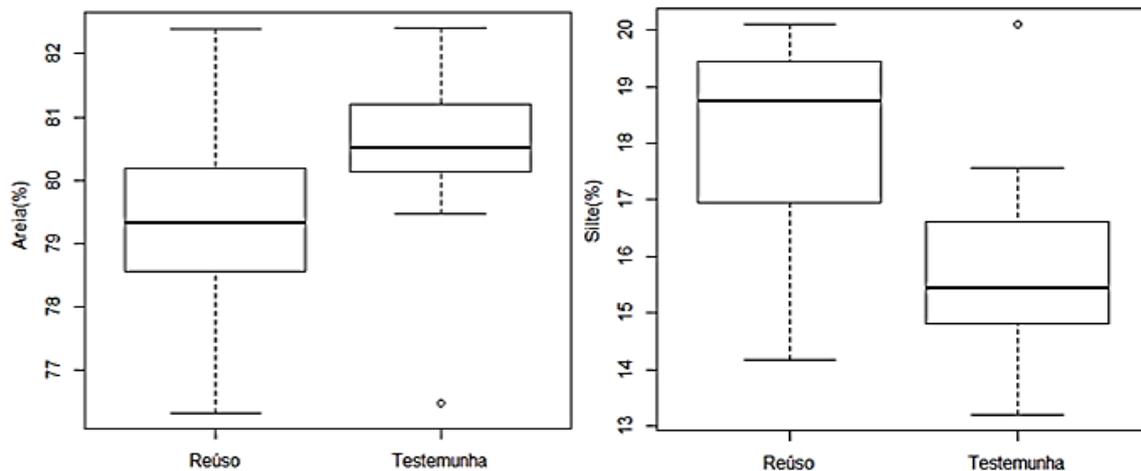
A maior dispersão na fração argila e sua redução na camada superficial irrigada com esgoto doméstico tratado também foi observada por outros autores. Varalho et al. (2010), após aplicação de água de reúso em um latossolo vermelho-amarelo de textura franco- argiloso-arenoso, observou a dispersão da argila nos 20 primeiros cm do solo. Mohammed et al. (2018), investigaram a qualidade do solo irrigado a cerca de 33 anos com água de esgoto tratada. As amostras da camada superficial dos solos eram de textura arenosa a franco-arenoso e as análises demonstraram que houve uma variação no teor de argila entre 3,2 e 16,9%.

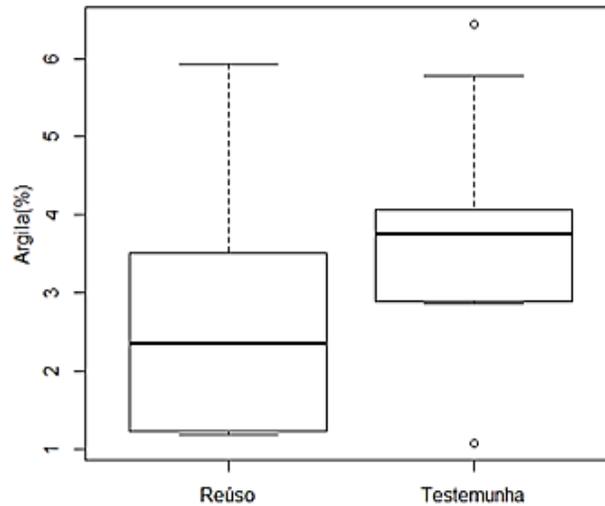
A dispersão de argila como também mudanças texturais a partir da irrigação com água residual tratada é mais significativa em solos de textura argilosa, mas de acordo com Leuther (2018), é possível observar a diminuição do teor de argila na camada superficial de solos arenosos, principalmente após longos períodos de irrigação. Esse processo ocorre devido a eluviação de partículas de silte e argila pela aplicação do efluente, fazendo com que a fração argila do solo mova-se verticalmente para camadas mais profundas.

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 95% de confiança, foi verificado a normalidade na distribuição dos dados para as duas áreas estudadas. Isso corrobora com Silva et al. (2010) e Souza (2005) que encontraram distribuição normal para as frações granulométricas do solo. Não foram encontradas diferenças significativas entre as médias para granulometria do solo (Tabela A.1).

A Figura 16 é a representação gráfica dos componentes texturais do solo exibidos pelo gráfico Boxplot. É possível verificar uma maior variabilidade para os dados da área irrigada com efluente tratado do que a testemunha. As frações silte e argila foram as que mais diferiram suas médias entre os tratamentos.

A Figura 16. Representação gráfica dos componentes texturais do solo exibidos pelo gráfico Boxplot.



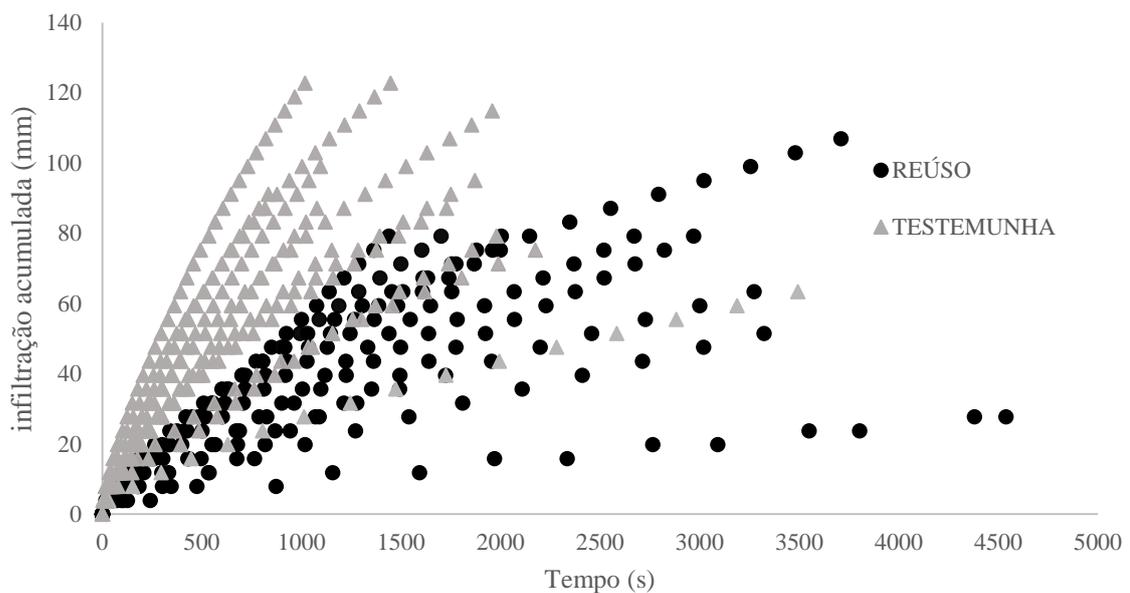


Fonte: Autor.

5.2 Comportamento da infiltração em solo sob irrigação com reúso e solo testemunha

Foram realizados 24 ensaios de infiltração, doze em cada área, e na figura 17 é possível observar o comportamento da lâmina infiltrada acumulada na área de reúso e na área testemunha. Ao analisar o gráfico observa-se uma maior variabilidade dos fluxos de infiltração dos pontos localizados na área irrigada com efluente doméstico. Esse comportamento é esperado pois essa área também apresentou maior dispersão entre os pontos texturais, corroborando com Souza (2005) e Oliveira Junior (2012), que observaram maior variação de infiltração nos solos onde havia maior dispersão textural.

Figura 17. Classe textural de um Planossolo sob irrigação com reúso e solo testemunha.



Fonte: Autor.

Mesmo apresentando a mesma classe textural é possível observar comportamentos distintos na taxa de infiltração de água no solo. Isso por que a infiltração é uma das propriedades hidráulicas influenciada, em maior ou menor grau, por fatores diversos além da textura como a organização e distribuição dos poros, porosidade, teor de matéria orgânica, acúmulo de argila dispersa, massa específica, umidade do solo e presença de partículas sólidas em suspensão (PERROUX & WHITE, 1988; TEIXEIRA, 2008; FILHO & RIBEIRO, 1996).

A duração dos ensaios de infiltração na área de reúso variou de 24 a 145 minutos, obtendo uma média de 54 minutos por ensaio. A lâmina acumulada desse solo variou entre 32 mm a 107 mm, com média de 70 mm por ensaio. Na área testemunha, sem a influência de irrigação, os ensaios variaram entre 14 a 58 minutos, tendo como média 28 minutos e a lâmina acumulada variou de 63 mm a 123 mm, obtendo uma média de 93 mm por ensaio. Analisando esses valores é possível verificar o aumento expressivo no tempo médio dos ensaios de infiltração do solo sob irrigação com reúso, cerca de 96% maior em relação ao solo sem aplicação de água residual.

Comparando os resultados de textura e infiltração do solo pode-se inferir que a área irrigada apresentou maior dispersão na granulometria do solo como também na taxa de infiltração. Esse resultado nos leva a observar uma menor permeabilidade do solo com reúso. Contudo, deve-se observar que o solo irrigado com água de reúso apresentou-se mais úmido, fator esse, que influencia na lâmina infiltrada. A umidade inicial da área testemunha foi de $0,06 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ enquanto a área irrigada foi de $0,10 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ (tabela 4).

Os resultados obtidos corroboram com os dados encontrados por Lado et al. (2005), no qual foi realizado um experimento com solos arenosos não calcários irrigados por mais de 10 anos com água residual tratada e comparado seus resultados com os de solos irrigados com água doce. Foi identificada uma redução da taxa de infiltração acumulada na área com reúso. Os testes ocorreram em solos inicialmente secos e foi obtido 79,5 mm para solo irrigado com água doce e 44,7 mm para solo irrigado com efluente tratado e em solo úmido no qual foi obtido 85,0 mm e 56,3 mm respectivamente. Esse comportamento na infiltração do solo foi devido ao aumento da RAS por conta da aplicação da água residual tratada. Os autores afirmam que o aumento da razão de adsorção de sódio provoca a dispersão de argila, perturbação na camada superficial do solo e mudanças estruturais, ocasionando assim, redução na taxa de infiltração bem como perda de solo por erosão.

Analisando a caracterização química do solo (tabela 2) é possível verificar que houve um aumento na RAS do solo irrigado com água residual tratada. A RAS do solo testemunha foi de $0,3 \text{ mmol.kg}^{-1}$ já no solo com aplicação do efluente foi encontrado RAS de $2,3 \text{ mmol.kg}^{-1}$. O sódio (Na) no solo passou de 20 mg.kg^{-1} para 141 mg.kg^{-1} . Mesmo assim as duas áreas são classificadas como não afetadas pelo sal, com $\text{RAS} < 6 \text{ mmol.kg}^{-1}$ (RENGASAMY, 2010). De acordo com Leuther (2019) o aumento da sodicidade é comum em áreas irrigadas e potencializado quando há uma irrigação com efluente tratado.

5.3 Comportamento das propriedades do solo em solo sob irrigação com reúso e solo testemunha.

5.3.1 Propriedades físico-hídricas (ρ_s , ρ_p , ϕ , θ_i , θ_f)

A análise estatística da densidade do solo (ρ_s), porosidade (ϕ), umidade inicial (θ_i) e umidade final (θ_f), representada na Tabela 4, demonstra, mais uma vez, a homogeneidade entre os valores médios dos parâmetros avaliados, uma vez que a densidade do solo, porosidade e umidade final apresentaram baixa variabilidade de acordo com os valores de coeficiente de variação proposto por Warrick e Nielsen (1980). A umidade inicial apresentou alta variação e diferença significativa a 95% segundo o teste de Tukey (Tabela A.2), indicando que o solo com reúso apresentou maior umidade inicial em relação ao solo da área não irrigada. Como o período de coleta das amostras de solo e a realização dos ensaios de infiltração foi realizado no final da estação chuvosa, nenhuma das áreas estavam sendo irrigadas, ou seja, ambas se encontravam em regime de sequeiro há três meses. A maior umidade encontrada no solo com efluente tratado pode ser atribuído ao fato de existir vegetação e ao sombreamento por conta das raquetes da palma forrageira, diferentemente do solo testemunha que estava descoberto. O volume total aplicado na área irrigada com reúso foi de 14,77 litros e na área testemunha 19,60 litros. A média para umidade final foi de $0,31 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ na área irrigada e $0,29 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para área testemunha. A umidade final não apresentou diferença significativa entre as médias de acordo com o teste de Tukey.

Observa-se um pequeno incremento da massa específica do solo na área de reúso, porém não foi identificada diferenças significativas (Tabela A.2). O solo testemunha apresentou massa específica do solo média de $1,56 \text{ g.cm}^{-3}$, enquanto que o solo com efluente tratado foi de $1,60 \text{ g.cm}^{-3}$. Os valores encontrados para massa específica não corroboram com Mojiri (2011) e Vogeler (2009), que observaram redução no valor de massa específica do solo na área de reúso

devido ao incremento de carbono provenientes das irrigações com água residual. Porém, Cappola et al. (2004) explica que os solos irrigados com águas residuais podem apresentar maior massa específica e menor porosidade total devido à dispersão e sedimentação de argila. Outro ponto a ser levado em consideração é o fato da água residual não ter aumentado significativamente o teor de matéria orgânica no solo e com isso não houve redução na densidade do solo como encontrado pelos autores Mojiri (2011) e Vogeler (2009).

O pequeno incremento da M.O no solo (Tabela 5), devido ao aumento de 14% do carbono orgânico total no solo irrigado com efluente doméstico tratado pode ser explicado pelo fato da lâmina de irrigação aplicada ser pequena, já que a palma forrageira é uma vegetação adaptada a aridez local e com pouca necessidade hídrica. De acordo com Lemos (2016), a palma forrageira consegue se desenvolver com uma lâmina de 5 mm a cada 15 dias. As áreas não apresentaram diferença significativa entre as médias de carbono orgânico incorporado no solo mas mostra uma tendência crescente. Um trabalho realizado seis meses antes, nesse mesmo local, para determinar a influência do efluente doméstico tratado para irrigação no estoque de carbono do solo mostrou que a área em estudo tinha 3,6 g/kg de Carbono Orgânico Total (CAVALCANTI, 2019).

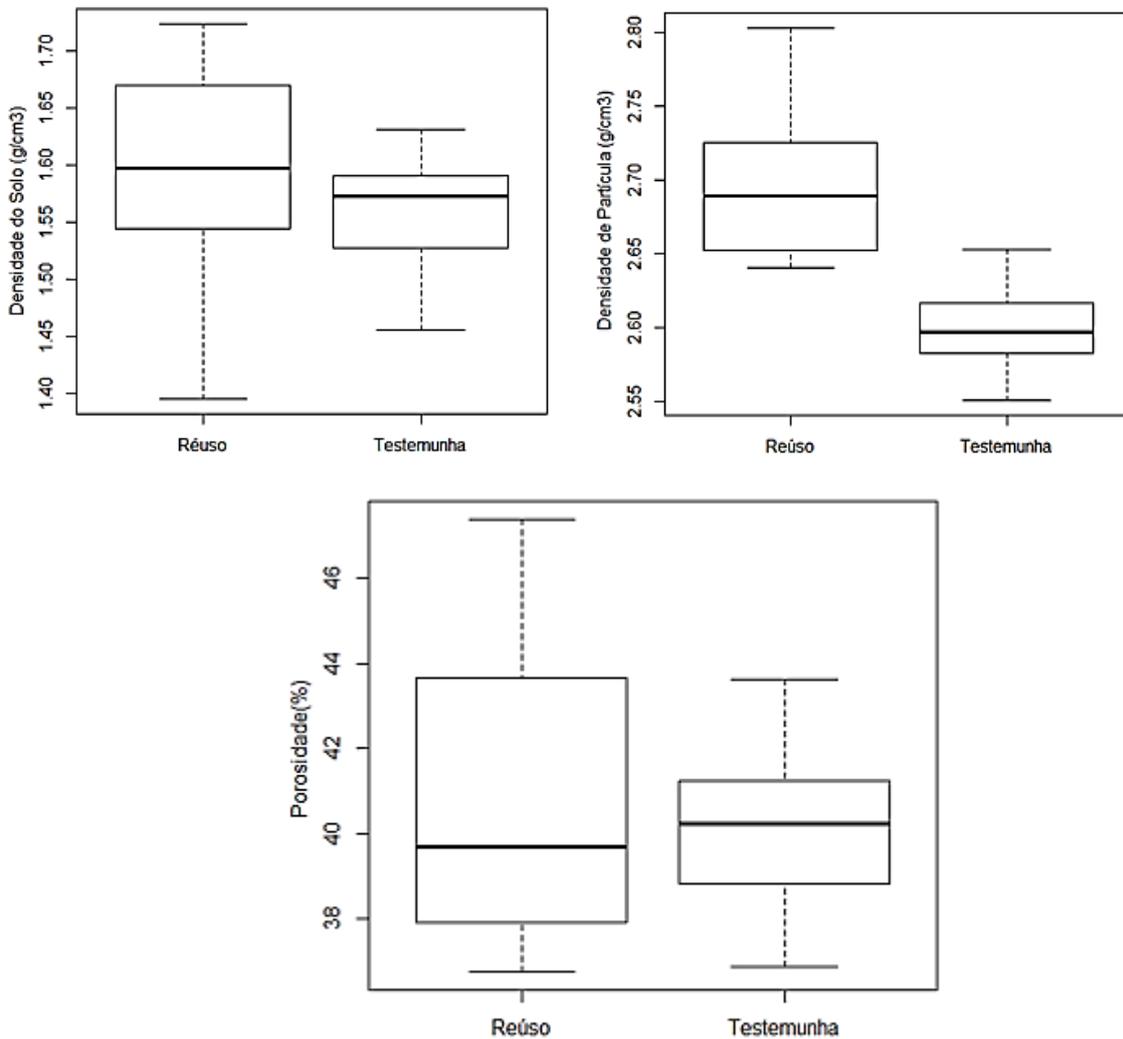
Tabela 4. Estatística das propriedades físico-hídricas

Parâmetros estatísticos	Reúso				Testemunha			
	ρ_s (g/cm ³)	ϕ (%)	θ_i (cm ³ /cm ³)	θ_f (cm ³ /cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	ϕ (%)	θ_i (cm ³ /cm ³)	θ_f (cm ³ /cm ³)
Média (μ)	1,60	40,87	0,10	0,31	1,56	40,10	0,06	0,29
Mediana (Med)	1,60	39,68	0,10	0,31	1,57	40,24	0,06	0,29
Desvio- Padrão (σ)	0,09	3,36	0,04	0,04	0,05	1,86	0,03	0,03
Variância (σ^2)	0,01	11,29	0,002	0,00	0,00	3,45	0,001	0,001
Coef. de Variação	5	8	40	11	3	5	50	9
Assimetria (C_s)	-0,68	0,55	-0,04	0,00	-0,55	0,09	0,21	-0,10
Valor Máximo (V_{\max})	1,72	47,37	0,17	0,37	1,63	43,61	0,12	0,33
Valor Mínimo (V_{\min})	1,40	36,76	0,04	0,26	1,46	36,87	0,01	0,24
Número de observações (N)	12	12	12	12	12	12	12	12
Shapiro-Wilk	0,27	0,73	0,33	0,69	1,00	0,82	0,71	0,34

Distribuição normal a 95% de probabilidade. ρ_s : densidade do solo; ϕ : porosidade do solo; θ_i : umidade inicial; θ_f : umidade final.

A porosidade do solo com efluente foi de 40,87% e da área testemunha foi de 40,10% não apresentando diferença entre as médias de acordo com o teste de Tukey. Avaliando o coeficiente de variação da porosidade e os gráficos Boxplot (Figura 18), pode-se observar que a área irrigada teve maior dispersão e amplitude dos dados, não apresentou homogeneidade diferentemente da área testemunha que está melhor distribuída e mais uniforme.

Figura 18. Representação gráfica pelo Boxplot da densidade do solo, densidade da partícula e porosidade.



Fonte: Autor.

De acordo com Cappola (2004), o ensaio de infiltração na camada superficial do solo, quando não há pressão superficial, está diretamente correlacionado com a porosidade, arranjo e tamanho dos poros. O maior teor de areia no solo testemunha, consequentemente maior número de macroporos poderia explicar a maior taxa de infiltração no solo. Além disso, Leuther (2018) e Nawal (2020), afirmaram que o uso de água residual na irrigação pode provocar o entupimento dos poros, alteração na porosidade total e no teor de argila da camada superficial,

mas que os solos de textura arenosa se mostravam muito mais resistentes a alterações físicas do que os solos argilosos. Nawal (2020) ainda enfatizou que o monitoramento do solo e da aplicação de efluente na irrigação podem nos revelar tendências, porém um solo arenoso poderia só vir a apresentar alguma alteração significativa em suas propriedades físicas após aproximadamente 40 anos de irrigação com efluente tratado.

Tabela 5. Estatística da densidade de partícula, carbono total e matéria orgânica

Parâmetros estatísticos	Reúso			Testemunha		
	ρ_p (g/cm ³)	COT (g/ kg)	MO (g/ kg)	ρ_p (g/cm ³)	COT (g/ kg)	MO (g/ kg)
Média (μ)	2,70	3,77	6,50	2,60	3,30	5,69
Mediana (Med)	2,69	3,69	6,36	2,60	3,23	5,56
Desvio- Padrão (σ)	0,05	0,74	1,27	0,03	0,67	1,15
Variância (σ^2)	0,00	0,54	1,62	0,00	0,45	1,32
Coef. de Variação (%)	2	20	20	1	20	20
Assimetria (C_s)	0,66	0,39	0,39	0,20	0,27	0,27
Valor Máximo ($V_{m\acute{a}x}$)	2,80	5,36	9,24	2,65	4,39	7,57
Valor Mínimo ($V_{m\acute{i}n}$)	2,64	2,56	4,41	2,55	2,46	4,24
Número de Observações (N)	12	12	12	12	12	12
Shapiro-Wilk	0,26	0,83	0,83	0,41	0,26	0,26

Distribuição normal a 95% de probabilidade; ρ_p : densidade de partícula; COT: Carbono Orgânico Total; MO: Matéria Orgânica

Mesmo com o aumento da matéria orgânica no solo irrigado com reúso não foi observado diferença significativa entre as médias. Segundo Gharaibeh et al. (2007), o incremento da matéria orgânica na camada superficial do solo, ainda que em pequenas quantidades, pode influenciar na condutividade hidráulica saturada do solo e na taxa de infiltração do mesmo. Porém, estudos realizados por Lado & Ben-Hur (2009) e Jueschke et al. (2008) demonstraram que o acréscimo da matéria orgânica nas camadas de 0-20 cm é inconsistente podendo inclusive ter seu teor no solo reduzido devido a uma maior atividade microbiana no solo e conseqüentemente uma aceleração na decomposição da matéria orgânica. Tarchouna et al. (2010) observaram redução da matéria orgânica na camada superficial de solos irrigados com água residual tratada e associaram ao fato das águas residuais fornecerem ao solo Carbono (C) e Nitrogênio (N) o que provoca aumento das atividades microbianas.

5.3.2 Parâmetros de forma das curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$ (m, n e η)

Os parâmetros de forma (m e n) da curva de retenção de água no solo $\theta(h)$ e o parâmetro (η) da curva de condutividade hidráulica $K(\theta)$ estão estatisticamente representados na tabela 6. As médias para m, n e η foram respectivamente 0,15; 2,36 e 8,64 para área de reúso e 0,16; 2,37 e 8,44 para o solo testemunha. As médias não apresentaram diferença estatística entre si de acordo com o teste de médias a 95% de probabilidade e ambas as áreas seguem distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk a 95% de confiança (Tabela A.4).

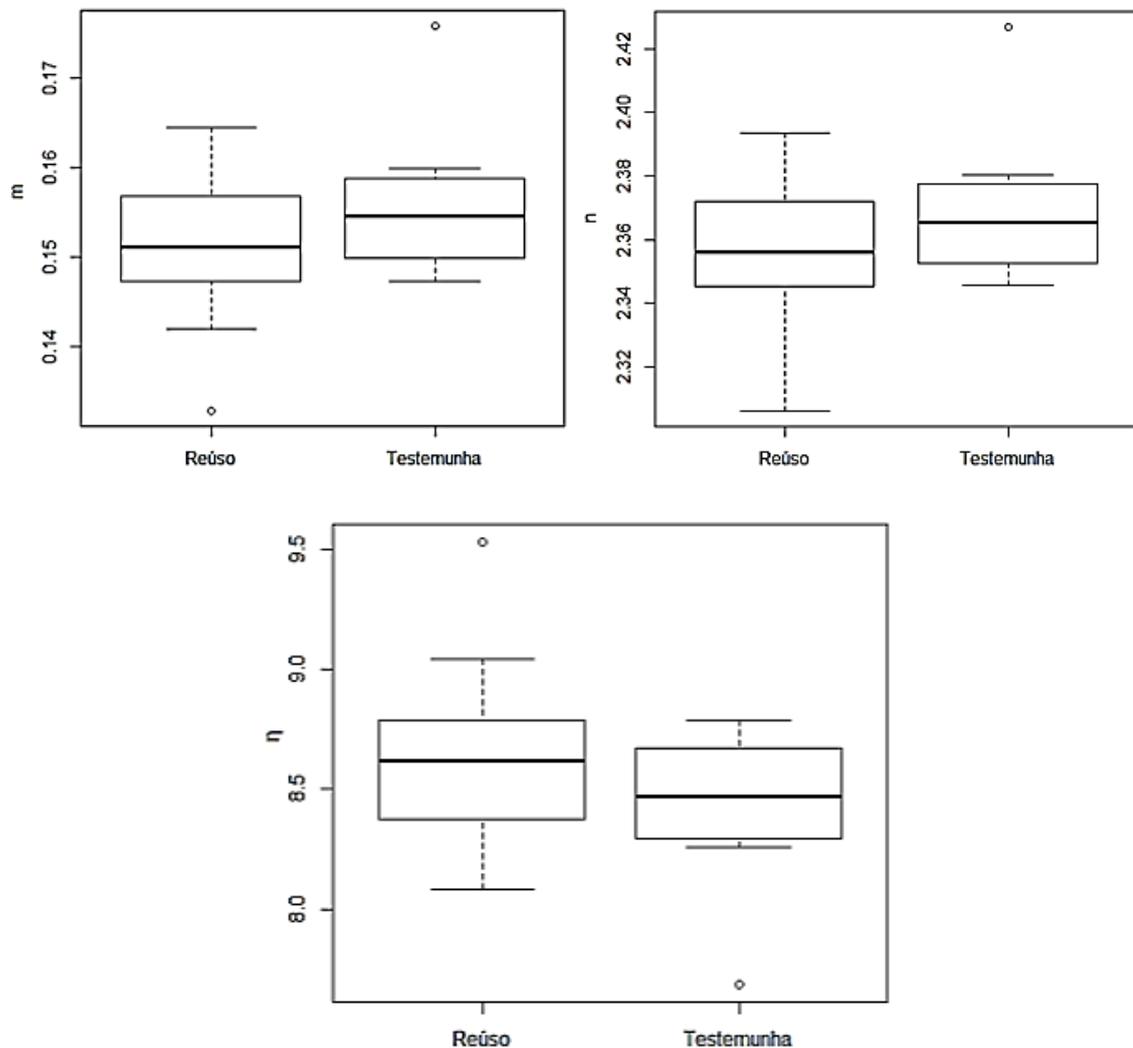
Tabela 6. Estatística dos parâmetros de forma das curvas θ (h) e $K(\theta)$ (m, n e η) do solo sob irrigação com reúso e solo testemunha.

Parâmetros estatísticos	Reúso			Testemunha		
	m	n	η	m	n	η
Média (μ)	0,15	2,36	8,64	0,16	2,37	8,44
Mediana (Med)	0,15	2,36	8,62	0,15	2,37	8,47
Desvio- Padrão (σ)	0,01	0,02	0,38	0,01	0,02	0,29
Variância (σ^2)	0,00007	0,001	0,146	0,0001	0,0004	0,084
Coef. de Variação (%)	6	1	4	5	1	3
Assimetria (C_s)	-0,42	-0,37	0,71	1,45	1,51	-1,18
Valor Máximo (V_{\max})	0,16	2,39	9,53	0,18	2,43	8,79
Valor Mínimo (V_{\min})	0,13	2,31	8,08	0,15	2,35	7,69
Número de observações (N)	12	12	12	12	12	12
Shapiro-Wilk	0,856	0,885	0,567	0,323	0,260	0,094

Distribuição normal a 95% de probabilidade; m, n e η : parâmetros de forma.

Avaliando os critérios estabelecidos por Warrick & Nielsen (1980) os parâmetros de forma (m, n e η) apresentaram baixo coeficiente de variação para as duas áreas estudadas e a proximidade entre as médias e medianas evidenciaram uma distribuição simétrica entre os dados, conforme apresentado no Boxplot (Figura 19). Os valores de n e m são dependentes da textura do solo (HAVERKAMP et al.,1998), portanto era esperado que não apresentassem diferença entre as duas áreas estudadas.

Figura 19. Representação gráfica, Boxplot, dos parâmetros de forma (m , n e η).



Fonte: Autor.

De acordo com Souza et al. (2008b), os parâmetros de forma m e n apresentam estabilidade temporal e aumentam proporcionalmente com o teor de areia no solo. Já o valor η assume valores menores em solos mais arenosos. O parâmetro η apresentou, como esperado devido a sua formulação matemática, valores inversamente proporcionais ao parâmetro n .

Lassabeterre et al. (2006) e Santos et al. (2012) avaliaram os parâmetros de forma para solos com diferentes classes texturais e observaram que solos mais grossos, com maior teor de areia, apresentavam valores mais altos para m e n , sendo observado o inverso para η . Esse resultado obtido pelos autores corroboram com os valores encontrados no presente estudo.

França Neto (2018) caracterizou hidricamente um Planossolo, franco arenoso, em área de caatinga e encontrou valores próximos de m (0,11) e n (2,25) quando comparados com os parâmetros do presente trabalho. O valor obtido para η (11,11) foi superior ao encontrado para

as duas áreas estudadas. Os valores médios para m , n e η na área de reúso (0,15; 2,36; 8,64) e na área testemunha (0,16; 2,37; 8,44) estão próximos aos valores encontrado por Souza et al. (2008b) que apresentou valores médios para m , n e η em solos arenosos com 0,13; 2,31 e 9,54, respectivamente.

Portanto, os parâmetros de forma das curvas de condutividade hidráulica e de retenção de água no solo, calculados a partir do BEST, para as duas áreas estudadas apresentaram-se consistentes com a textura do solo e com os valores encontrados pela literatura.

5.3.3 Parâmetros de normalização e hidrodinâmicos θ_s , K_s , hg e S

Os valores estatísticos para os dados de normalização (θ_s , K_s e hg) e para sorvidade (S) estão descritos na Tabela 7. Os valores encontrados, respectivamente, para θ_s , K_s , hg e S foram 0,41; 0,02; -26,25 e 0,46 para área de reúso e 0,40; 0,03; -76,61 e 0,99 para área testemunha. A sorvidade e o potencial de entrada de ar (hg) foram estatisticamente diferentes entre os tratamentos segundo o teste de Tukey a 95% de probabilidade (Tabela A.5).

Tabela 7. Estatística dos parâmetros de normalização e hidrodinâmicos θ_s , K_s e hg do solo sob irrigação com reúso e solo testemunha.

Parâmetros estatísticos	Reúso				Testemunha			
	S (mm/s ^{0,5})	θ_s (cm ³ /cm ³)	K_s (mm/s)	hg (mm)	S (mm/s ^{0,5})	θ_s (cm ³ /cm ³)	K_s (mm/s)	hg (mm)
Média (μ)	0,455	0,409	0,019	-26,248	0,995	0,401	0,031	-76,606
Mediana (Med)	0,437	0,397	0,019	-29,638	0,979	0,402	0,023	-62,922
Desvio- Padrão (σ)	0,205	0,034	0,012	17,057	0,280	0,019	0,023	56,775
Variância (σ^2)	0,042	0,001	0,0002	290,939	0,078	0,000	0,001	323,389
Coef. de Variação (%)	45	82	64	65	28	46	75	74
Assimetria (C_s)	0,137	0,556	0,457	-0,032	-0,101	0,097	0,940	-1,657
Valor Máximo ($V_{m\acute{a}x}$)	0,739	0,474	0,046	-1,845	1,428	0,436	0,085	-15,972
Valor Mínimo ($V_{m\acute{i}n}$)	0,184	0,368	0,002	-50,535	0,503	0,369	0,004	-231,824
Número de observações (N)	12	12	12	12	12	12	12	12
Shapiro-Wilk	0,153	0,267	0,746	0,244	0,853	0,999	0,215	0,097

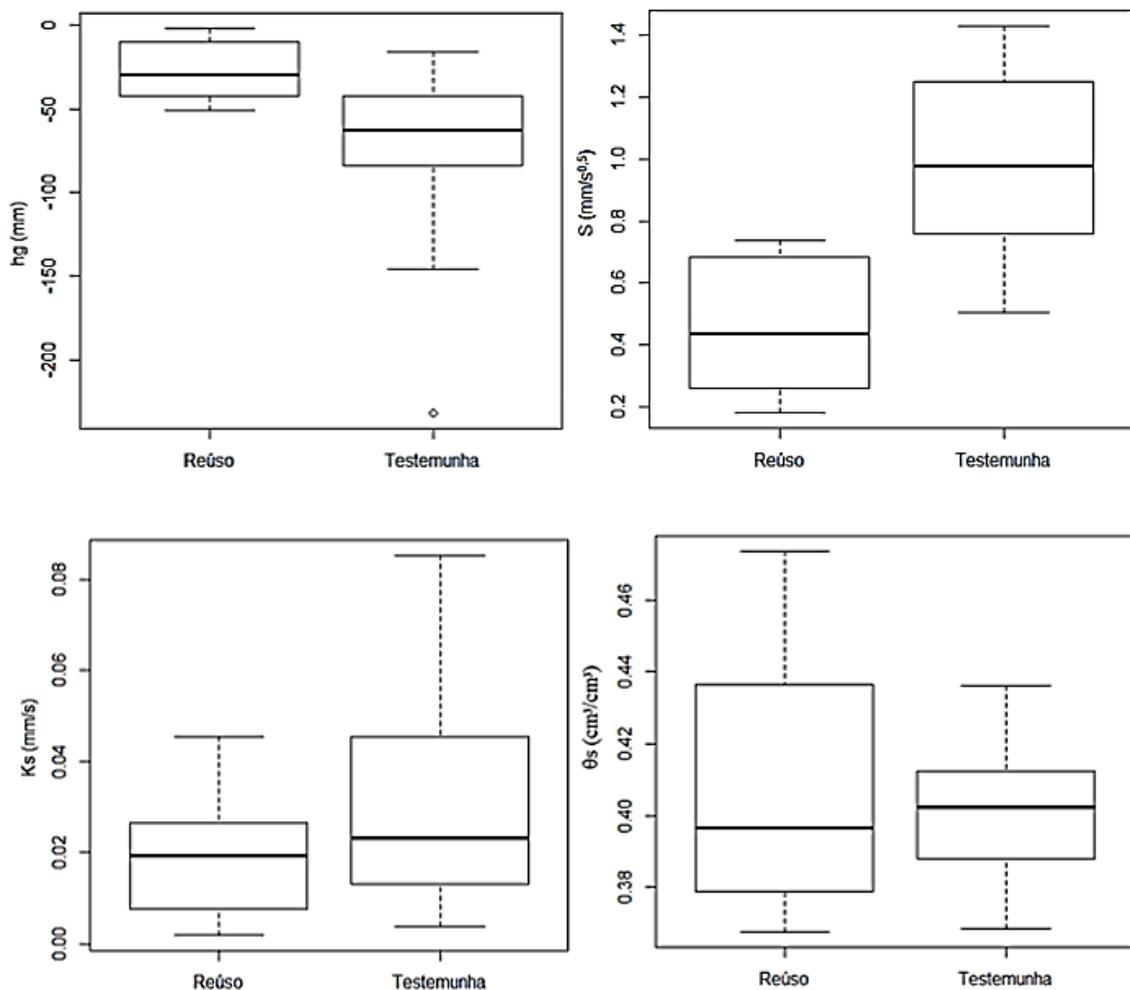
Distribuição normal a 95% de probabilidade; S: sorvidade; θ_s : umidade saturada; K_s : condutividade hidráulica saturada; hg : potencial de entrada de ar no solo.

A umidade saturada do solo com reúso foi de 0,409 cm.cm⁻³ e do solo testemunha foi de 0,401 cm.cm⁻³. Não houve diferença significativa entre as médias e ambas as áreas

apresentaram alta variabilidade. A maior dispersão dos dados ocorreu para área com efluente tratado demonstrando um comportamento não homogêneo do solo com reúso (Figura 20).

O potencial de entrada de ar no solo (h_g) mostrou alta variabilidade entre os pontos analisados, demonstrando assimetria negativa e maior amplitude na área testemunha, como pode ser confirmado no gráfico Boxplot (Figura 20). Os valores máximos e mínimos para área reúso foram -1,845 e -50,535 respectivamente e para área testemunha -15,972 e -231,824. França Neto (2018) e Cavalcanti (2012) encontraram alta variabilidade para o potencial de entrada de ar no solo em um Planossolo de textura areia franca e franco arenosa e atribuíram à sensibilidade desse parâmetro a variação na estrutura e textura do solo.

Figura 20. Representação gráfica, Boxplot, dos parâmetros de normalização e hidrodinâmicos.



Fonte: Autor.

A sorvidade do solo representa a capacidade do mesmo em absorver água por capilaridade. Esse parâmetro depende da umidade do solo, variando de acordo com a faixa de umidade encontrada antes e após o ensaio de infiltração. Foi observado uma redução de 54,3%

nos solos da área com reúso. A umidade inicial e final da área testemunha foi de $0,06 \text{ cm.cm}^{-3}$ e $0,29 \text{ cm.cm}^{-3}$, respectivamente, enquanto que da área irrigada com efluente tratado foi de $0,10 \text{ cm.cm}^{-3}$ e $0,31 \text{ cm.cm}^{-3}$. Oliveira Junior (2012) e Souza (2005) identificaram que solos com menor umidade inicial e menor densidade de partícula apresentavam maior valor na sorvidade do solo, relaciona-se esse comportamento ao fato da sorvidade variar não só com a umidade inicial como também com a estrutura do solo. Logo, era esperado que os valores médios de S fossem maiores para a área testemunha que apresentou menor umidade inicial e menor densidade de partícula.

A condutividade hidráulica do solo saturado para a área testemunha foi 63,2% superior ao encontrado para a área de reúso. A média para o solo testemunha foi de $0,031 \text{ mm.s}^{-1}$ e para área irrigada foi de $0,019 \text{ mm.s}^{-1}$. As duas áreas apresentaram alta variabilidade e maior dispersão dos dados para o solo testemunha, contudo as médias não apresentaram diferença significativa entre si. A redução do Ks encontrado no solo com aplicação de efluente tratado para irrigação pode ser atribuído ao aumento de sódio no solo e conseqüentemente aumento da RAS (Tabela 2). Houve um aumento de sódio (Na) superior a 700% no solo com aplicação de reúso e redução de cálcio (Ca) de 410 mg.kg^{-1} no solo testemunha para 276 mg.kg^{-1} no solo de reúso. De acordo com Mac & Amrhein (2001), o aumento da razão de absorção de sódio reduz significativamente a capacidade do solo em transmitir água, devido a mudança da estrutura do solo com o aumento do Sódio. Esse aumento no teor de Na também está correlacionado com a dispersão da fração argila observada na área de reúso, que influencia nos valores da Ks. Mohammed et al.(2018), observou a redução de argila na camada superficial de solos irrigados com efluente tratado provocando mudança textural dependendo do período de aplicação do efluente, causado pela eluviação de partículas de silte e areia para camadas mais profundas.

Outros autores também observaram uma relação entre a redução da condutividade hidráulica do solo com o aumento da RAS. Abegunrin et al. (2016), analisou o efeito da irrigação com efluente tratado em solos com diferente tipos de textura e culturas comparando-os com solos em regime de sequeiro. Foi observado que todos os solos com irrigação de efluente tratado apresentaram aumento da RAS do solo e redução na condutividade hidráulica, com menores valores de Ks observados na superfície do solo (0-10cm) o que afetou adversamente as propriedades hidráulicas e dinâmicas da água no solo. Leuther et al. (2018) avaliou solos de textura arenosa e solos de textura argilosa em regime de sequeiro, irrigação com água doce e aplicação de água residual tratada. Não foram identificadas diferença significativa para a redução do Ks no solo irrigado, mas foi observado sua redução na área irrigada com efluente

doméstico tratado, apresentando menor condutividade entre os solos avaliados no experimento. Os autores observaram aumento significativos na RAS e da condutividade elétrica dos solo irrigados com efluente, porém foram classificados como não afetados pelo sal.

5.3.4 Escalas características (λ_m , λ_c e C_{λ_m})

Os fatores que afetam o fluxo de água no solo são a geometria da fonte de água, gravidade e capilaridade (SOZA, 2005). O raio característico de poros hidraulicamente ativos (λ_m), comprimento capilar (λ_c) e a concentração de poros hidraulicamente ativos (C_{λ_m}) são denominadas de escalas características porque são formas de caracterizar os fatores que afetam o fluxo de entrada de água no solo durante o processo de infiltração. Os valores médios obtidos pelo BEST para os parâmetros de escala λ_m , λ_c , C_{λ_m} foram respectivamente 0,853 mm, 22,52 mm e $1,16 \cdot 10^3$ N° de poros.m⁻² para o solo com irrigação e 0,158 mm, 72,67 mm e $1,12 \cdot 10^5$ N° de poros.m⁻² para o solo testemunha. As escalas características do solo apresentaram alta variabilidade de acordo critérios estabelecidos por Warrick & Nielsen (1980) e diferença estatística entre as médias de acordo com o teste de Tukey (5%) para o raio característico de poros hidraulicamente ativos e para o comprimento capilar (Tabela A.6).

Tabela 8. Estatística das escalas características (λ_m , λ_c e C_{λ_m})

Parâmetros estatísticos	Reúso			Testemunha		
	λ_m (mm)	λ_c (mm)	C_{λ_m} (N° de poros.m ⁻²)	λ_m (mm)	λ_c (mm)	C_{λ_m} (N° de poros.m ⁻²)
Média (μ)	0,853	22,525	$1,16 \cdot 10^3$	0,158	72,673	$1,12 \cdot 10^5$
Mediana (Med)	0,310	23,829	178,31	0,122	59,927	175104,00
Desvio- Padrão (σ)	1,066	15,258	$1,82 \cdot 10^3$	0,112	55,521	$2,15 \cdot 10^5$
Variância (σ^2)	1,136	232,804	$3,30 \cdot 10^6$	0,012	3082,607	$4,63 \cdot 10^{10}$
Coef. de Variação (%)	125	68	156	70,7	76	194
Assimetria (C_s)	1,895	0,153	1,930	1,780	1,680	2,254
Valor Máximo ($V_{m\acute{a}x}$)	3,853	47,238	$6,42 \cdot 10^3$	0,4793	222,084	$7,51 \cdot 10^5$
Valor Mínimo ($V_{m\acute{i}n}$)	0,155	1,902	0,027	0,033	15,293	231,817
Número de observações (N)	12	12	12	12	12	12
Shapiro-Wilk	0,001	0,353	0,001	0,009	0,004	0,001

λ_m : raio característico de poros hidraulicamente ativos; λ_c : comprimento capilar; C_{λ_m} : concentração de poros hidraulicamente ativos.

A concentração de poros, sua continuidade e o raio dos poros hidráulicamente ativos interferem no processo de infiltração tridimensional. Os valores médios do raio dos poros hidráulicamente ativos (λ_m), que efetivamente transportam água, foram 500% superiores na área de reúso. Porém a concentração dos poros hidráulicamente ativos ($C\lambda_m$), foi superior na escala de 10^2 na área testemunha. Com o aumento do raio de poros hidráulicamente ativos é esperado que o solo apresente maior condutividade hidráulica saturada e maior sorvidade. Esse comportamento não foi observado no estudo em questão. Isso porque a área irrigada com efluente tratado mesmo apresentando maior (λ_m) em relação ao solo testemunha teve menor K_s e menor taxa de infiltração no solo, mostrando-se menos permeável do que o solo testemunha. Souza et al. (2008b) identificou que solos com a mesma textura poderiam apresentar comportamentos distintos para a entrada de água devido a modificações na estrutura do solo. Os autores observaram que a redução do (λ_m) poderia ser compensada pelo aumento da densidade dos poros ($C\lambda_m$), quantidade de poros por unidade de área e assim consequentemente ter o aumento da condutividade hidráulica saturada.

Analisando os dados obtidos (Tabela 8) observa-se que o solo testemunha teve um valor menor pra (λ_m) contudo a densidade desse poros aumentou consideravelmente ($C\lambda_m$) o que explicaria ter apresentado maior condutividade hidráulica e maior sorvidade em comparação com a área irrigada. O comportamento dos parâmetros de escala obtidos permitem inferir que houve uma modificação na estrutura do solo, mesmo que não tenha existido mudança textural.

O comprimento capilar (λ_c) foi maior no solo testemunha do que no solo com aplicação de efluente tratado. Esse parâmetro de escala está relacionado com as forças capilares atuantes no solo em relação a gravidade durante o ensaio de infiltração. A partir dos resultados é possível afirmar que durante o processo de infiltração a ação das forças capilares foi maior no solo testemunha do que no solo com reúso. Isso também pode ser confirmado quando analisado o raio característico, quando maior for o (λ_m) maior será o efeito da gravidade em comparação a capilaridade e menor a sorvidade do solo.

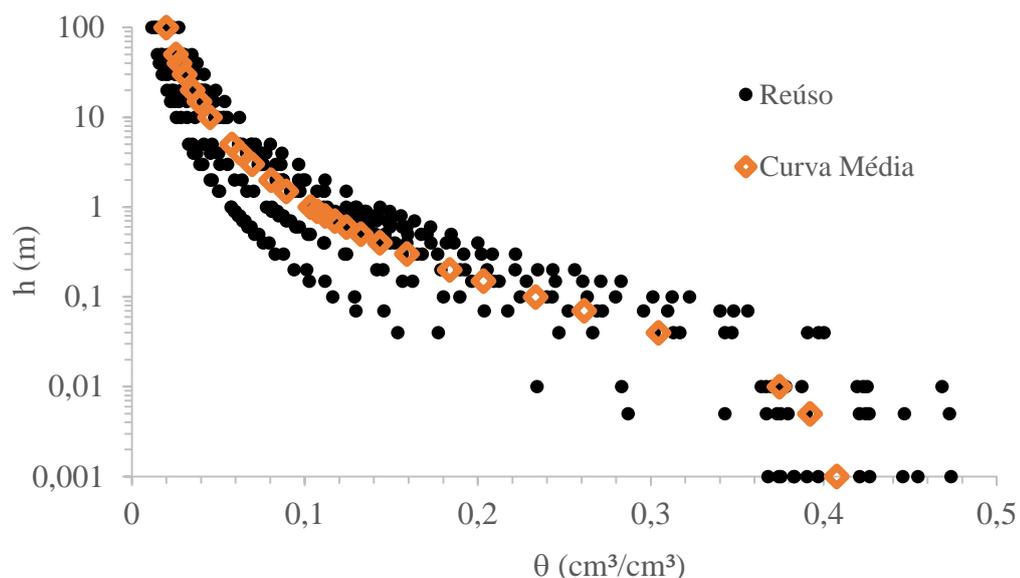
5.4 Curvas de retenção e de condutividade hidráulica da água no solo

As curvas de retenção e as curvas de condutividade hidráulica representadas nas figuras 21 e 23 respectivamente, foram determinadas a partir dos parâmetros de forma (m , n e η) e dos

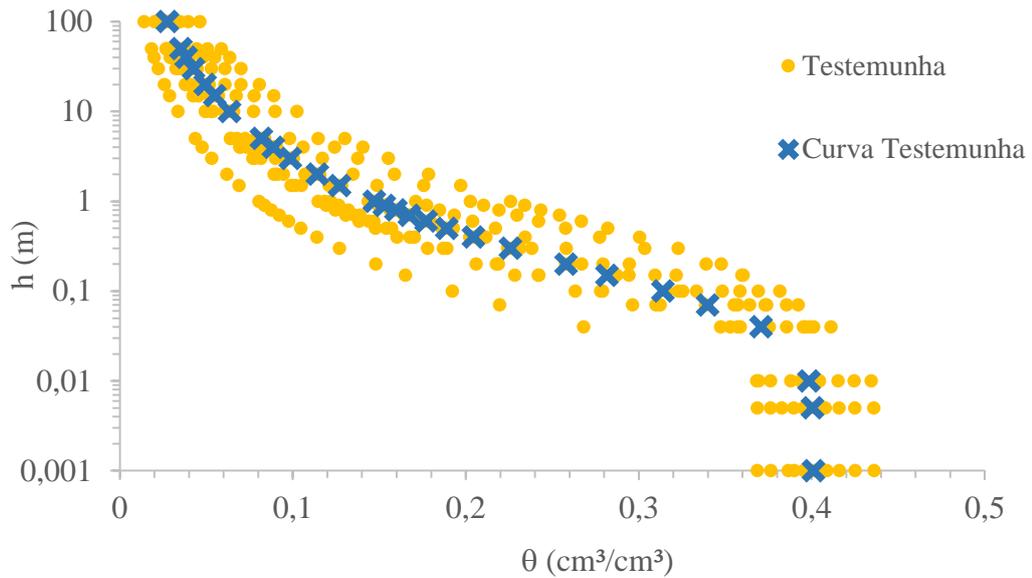
parâmetros de normalização (θ_s , K_s , h_g). Observando os gráficos da Figura 21 e as curvas médias de retenção (Figura 22) é possível identificar um ponto de inflexão das curvas, característica do modelo Beerkan, logo após a saturação. Isso ocorre devido a entrada de ar e corresponde ao valor do potencial de entrada de ar (h_g) na matriz porosa do solo (SOUZA et al., 2008b; OLIVEIRA JUNIOR, 2012, CALVALCANTI, 2012). Pode-se observar que o ponto de inflexão no solo testemunha foi maior do que o solo com reúso sendo necessário maior pressão matricial para que houvesse a entrada de ar no solo demonstrando que o solo testemunha consegue reter à água por mais tempo e isso releva uma maior atuação de forças capilares e de adsorção. De acordo com Libardi (2005), quanto maior potencial, ou seja, maior a energia necessária para retirada de água no solo, maior é a atuação das forças de adsorção e capilaridade.

Os valores de umidade para o solo com irrigação apresentaram-se mais dispersos do que para o solo testemunha. Essa dispersão dos pontos em relação a curva média se intensificou a medida que o h diminui. Observa-se que a umidade para o solo testemunha variou entre 0,37 e 0,44 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, com umidade média de saturação de 0,401 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$. Já o solo irrigado com água residual tratada variou entre 0,37 e 0,48 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ com umidade média de saturação de 0,409 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$. Para um potencial de $h = 1\text{m}$ o solo com irrigação variou de 0,06 a 0,14 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e o solo testemunha variou de 0,08 a 0,23 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, enquanto que para $h=10\text{m}$ a umidade variou entre 0,03 a 0,06 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e 0,03 a 0,10 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ respectivamente para o solo com reúso e o testemunha (Figura 21).

Figura 21. Curvas de retenção da água no solo sob irrigação com água de reúso (a) e solo testemunha (b)



(a)



(b)

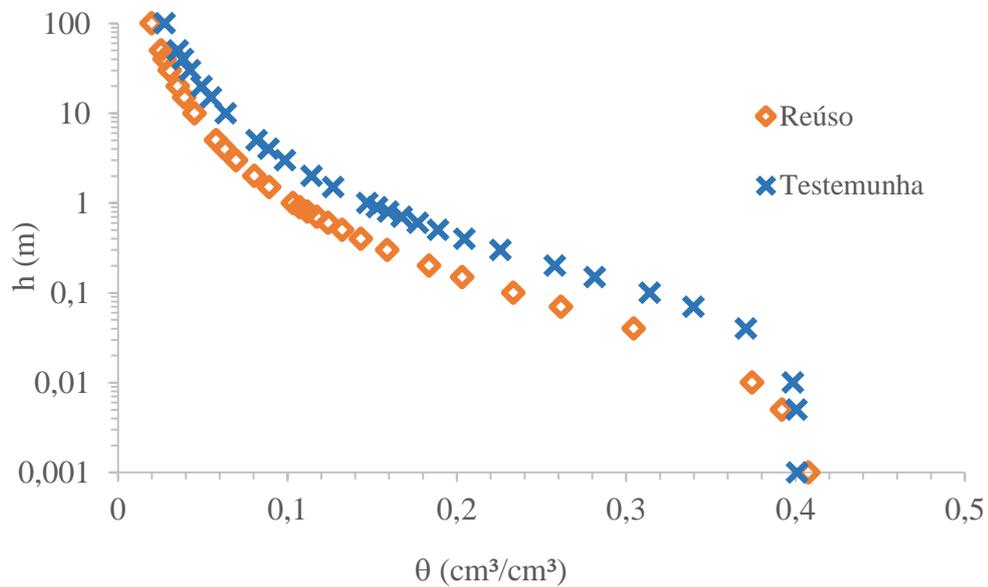
Fonte: Autor.

Comparando as curvas médias para as duas áreas estudadas (Figura 22), observa-se que para todos os potenciais os valores de umidade foram maiores para o solo testemunha. Indicando que esse solo possui uma maior capacidade de retenção hídrica. Essa retenção encontrada corrobora com o fato do solo testemunha ter apresentado forças capilares (λc) mais atuantes durante o processo de infiltração do que o solo com reúso.

É possível inferir a partir das curvas médias dos solos que a área testemunha tem maior janela de água disponível para a cultura. Essa diferença na curva de retenção, mesmo os dois solos sendo classificados na mesma classe textural (areia franca), foi explicada por Alves & Suzuki (2004) e Tretin (2005). Os autores observaram que mesmo a textura do solo sendo um dos principais fatores de influência sobre sua capacidade de retenção de água, as curvas podem apresentar diferenças devido ao teor de matéria orgânica, ao tipo de argila e diferenças de microestruturas. Mesmo o solo com aplicação de efluente tratado para irrigação conter maior teor de matéria orgânica do que o solo testemunha não foi suficiente para aumentar a capacidade de retenção hídrica. A dispersão de argila e a modificação da estrutura do solo provocada pelo acréscimo de sódio e da RAS do solo se mostram mais atuantes no comportamento da água no solo. Quando há aplicação de águas com valores elevados de sódio, como as águas residuais, deve-se ter uma maior atenção com a fração de argila. Segundo Paganini (2003) altas concentrações de sódio no solo podem dispersar a argila, provocar alterações na estrutura

diminuindo assim a permeabilidade do solo e alterar o movimento da água através de fluxos preferenciais.

Figura 22. Curvas de retenção médias para o solo sob irrigação com reúso e para o solo testemunha.



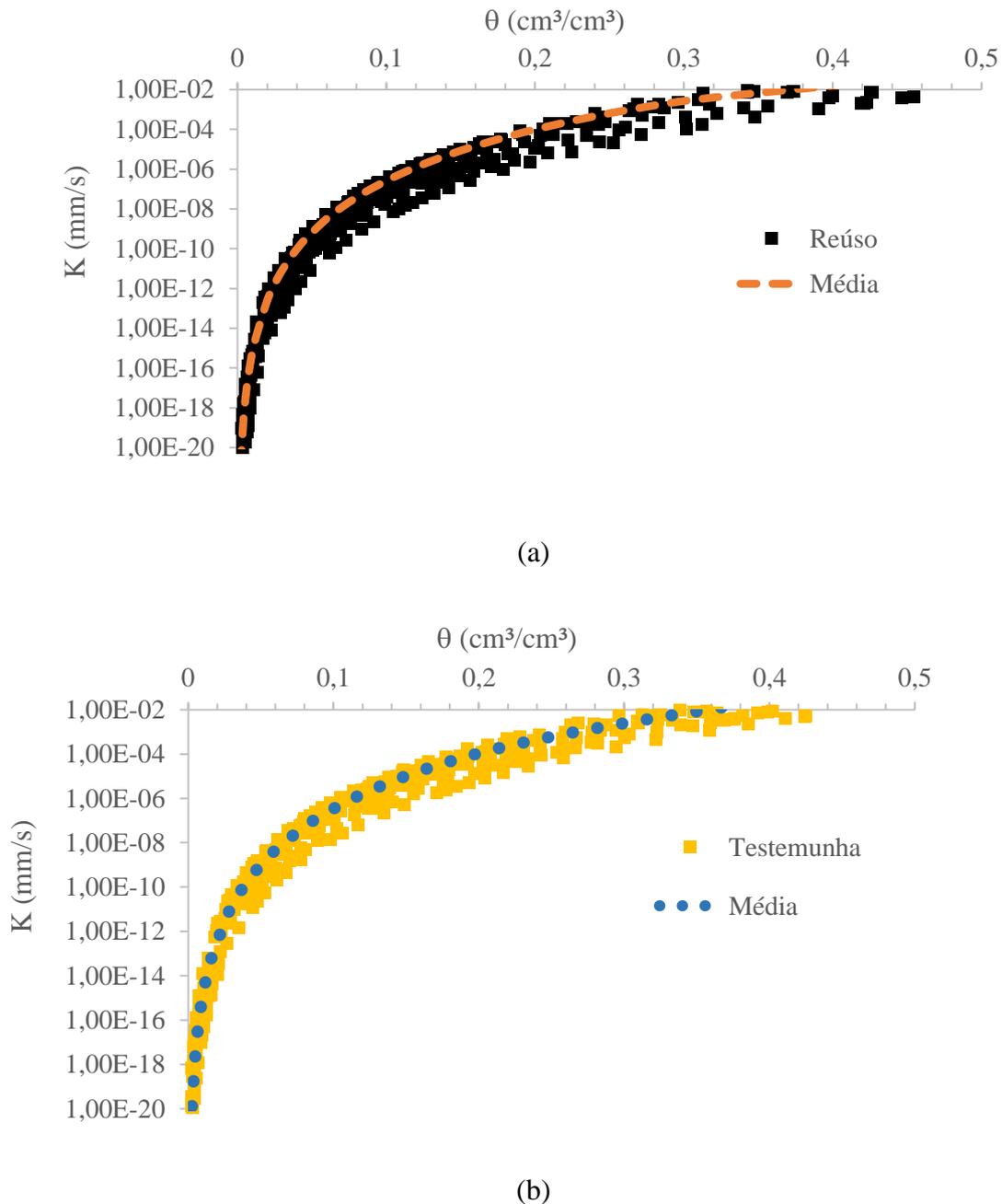
Fonte: Autor.

O comportamento da condutividade hidráulica para os dois solos está representado na Figura 23. É possível deduzir que o solo sob irrigação com água residual, apesar da semelhança no comportamento das curvas, apresentou maior dispersão dos seus valores quando comparados com a condutividade do solo testemunha. A dispersão observada entre as duas áreas pode ser justificada devido a área testemunha ter sido mais homogênea em relação aos seus parâmetros físicos como textura, porosidade, densidade do solo, que influenciam movimentação da água no solo. Adhikari et al. (2012), avaliou solos de diferentes texturas irrigados com efluente tratado no Novo México onde realizou testes de infiltração e porosidade do solo. Os autores identificaram que locais onde a condutividade hidráulica saturada foi reduzida apresentavam macroporosidade significativamente menor e o teor de Na significativamente maior do que os solos não irrigados com efluente tratados, que apresentaram maior K_s . As águas residuais aplicadas nos solos apresentaram valores altos de sódio e seu incremento ao solo afetou a captação de água pela vegetação nativa.

O entupimento dos poros ocorre devido ao acúmulo de argila dispersa e de partículas sólidas em suspensão. Observa-se que a presença de água salínica/sódica deterioram a estrutura do solo e causam inchaço e dispersão das partículas do solo modificando o movimento da água (GHARAIBEH et al., 2007; QADIR et al., 2010; TUNC & SAHIN, 2016). O estudo em tela

não apresentou redução da porosidade no solo irrigado com efluente tratado, mas analisando o gráfico da figura 24 foi clara a redução da condutividade do solo quando atinge a saturação em relação ao solo testemunha sendo necessário um estudo de imagens do solo para verificar mudanças no arranjo dos poros e identificar possíveis entupimentos ou redução dos macroporos.

Figura 23. Curvas de condutividade hidráulica no solo sob irrigação com água de reúso (a) e solo testemunha (b)

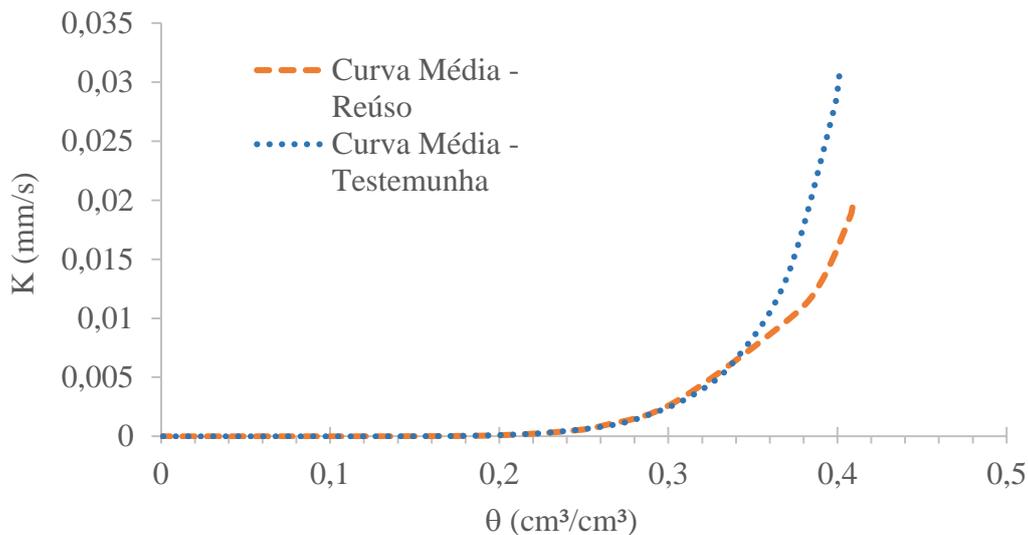


Fonte: Autor.

A partir da comparação das curvas médias de condutividade hidráulica das duas áreas (Figura 24), observa-se maior diferença na permeabilidade do solo. O solo testemunha

apresentou-se mais permeável quando atinge a saturação do que a área sob irrigação. A redução da condutividade hidráulica em áreas irrigadas com reúso também foi observada por Varalho et al. (2012), que identificaram uma redução de aproximadamente 16% na condutividade hidráulica do solo saturado após irrigação com efluente tratado, e justificou essa diminuição devido aos sais provenientes da água de reúso que favorecem na dispersão da argila e obstrução dos poros.

Figura 24. Curvas de condutividade hidráulica médias para o solo sob irrigação com reúso e para o solo testemunha.



Fonte: Autor.

5.5 Repelência

Os valores estatísticos do teste de repelência para as duas áreas estão descritos na tabela 9. A partir da média encontrada pode-se constatar que o solo testemunha e o solo com aplicação de efluente tratado para irrigação apresentaram-se como classe I, molhável, de acordo com a classificação de Bisdom et al.(1993), não sendo identificada nenhuma hidrofobicidade do solo. Travis et al. (2010), realizando um estudo de repelência á água no solo devido a aplicação de efluente também não identificou hidrofobicidade em solos arenosos e atribuiu isso ao curto período de aplicação do efluente tratado para irrigação. Os autores avaliaram que nos solos estudados seria necessário uma irrigação por longo período de tempo, superior a 20 anos para que ocorresse acréscimo de matéria orgânica e outros componentes hidrofóbicos no solo, além disso a hidrofobicidade estaria relacionada também a qualidade do efluente utilizado.

Os baixos valores encontrados na área de reúso em Santana do Serindó podem estar relacionados tanto ao curto período de aplicação da água residual tratada quanto ao período em que foi realizada a coleta de solo. A região encontrava-se em final de período chuvoso e com isso a irrigação com efluente tratado estava suspensa, pois devido à baixa necessidade hídrica da palma forrageira só há irrigação com efluente nos períodos de seca. Devido à baixa necessidade hídrica da palma forrageira e, conseqüentemente, pequena lâmina de irrigação aplicada não houve acréscimo suficiente de matéria orgânica e componentes hidrofóbicos no solo que pudessem ocasionar a repelência à água.

Essa relação transitória da hidrofobicidade do solo dependendo do período de avaliação foi identificada por Thwaites et al (2006) que avaliaram a repelência à água em um solo de textura arenosa sob três sistemas de irrigação, sendo um deles com água residual tratada durante o período de cinco meses (novembro/2003 a março/2004). Os autores conseguiram identificar a natureza transitória da repelência dependendo do teor de água no solo. Identificou-se que no início da estação de irrigação o solo apresentou-se de fortemente repelente a extremamente repelente e ao final da estação de irrigação, quando o solo estava mais úmido foi classificado como levemente repelente a molhável. Também foi identificada uma mudança no comportamento da repelência em relação ao período do ano, onde nas estações mais chuvosas o solo passou de extremamente repelente a levemente repelente.

De acordo com Hallet et al.(2001), Mataix-Solera e Doerr, (2004) há uma correlação direta entre a quantidade de matéria orgânica no solo e sua maior classificação de repelência a água. Já Woche et al.(2005) e Arye et al.(2011) defendem que a interferência na hidrofobicidade do solo não está relacionada só à quantidade de M.O, mas se houve processo de maturação e mumificação, essenciais para o desenvolvimento da M.O hidrofóbica.

Os valores obtidos foram considerados normais a partir do teste de Shapiro-Wilk 5% e apresentaram variabilidade média a alta de acordo com o coeficiente de variação (CV). Os resultados, de certa forma, corroboram aos de Zhipeng et al. (2019) que encontraram alta variação para os dados de repelência de solos irrigados com águas residuais e não identificaram comportamento homogêneo para a repelência no solo. A repelência à água no solo é uma propriedade física transitória e distribuída espacialmente de forma heterogênea, podendo ser alterada de acordo com a exposição do solo a componentes hidrofóbicos, teor de água no solo e apresentando-se mais variável do que outras propriedades físicas como a densidade aparente, retenção e condutividade hidráulica (CAMBARDELLA et al., 1994; WANG e SHAO, 2013).

Tabela 9. Estatística do tempo de penetração da gota, carbono total e matéria orgânica

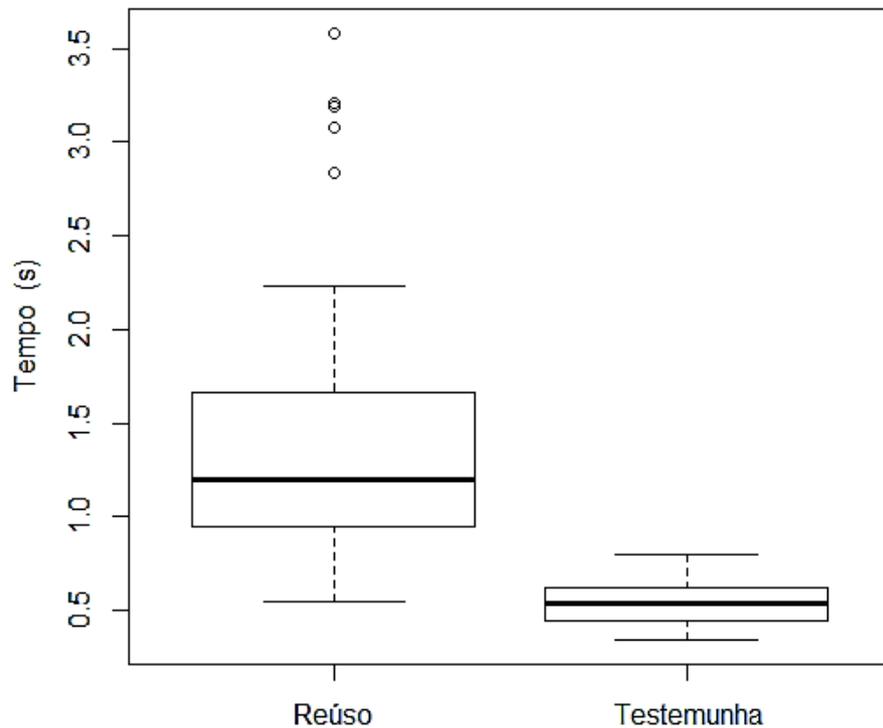
Parâmetros estatísticos	Reúso			Testemunha		
	Tempo de penetração da gota (s)	COT (g/ kg)	MO (g/ kg)	Tempo de penetração da gota (s)	COT (g/ kg)	MO (g/ kg)
Média (μ)	1,41	3,77	6,50	0,54	3,30	5,69
Mediana (Med)	1,25	3,69	6,36	0,51	3,23	5,56
Desvio- Padrão (σ)	0,46	0,74	1,27	0,10	0,67	1,15
Variância (σ^2)	0,21	0,54	1,62	0,01	0,45	1,32
Coef. de Variação (%)	32,7	20	20	18	20	20
Assimetria (C_s)	0,77	0,39	0,39	0,57	0,27	0,27
Valor Máximo ($V_{m\acute{a}x}$)	2,38	5,36	9,24	0,71	4,39	7,57
Valor Mínimo ($V_{m\acute{i}n}$)	0,92	2,56	4,41	0,43	2,46	4,24
Número de observações (N°)	12	12	12	12	12	12
Shapiro-Wilk	0,12	0,83	0,83	0,07	0,26	0,26

Distribuição normal a 95% de probabilidade; COT= Carbono Orgânico Total; MO= Matéria Orgânica

O solo testemunha mostrou-se mais homogêneo enquanto o solo irrigado com efluente tratado apresentou maior variabilidade dos dados e pontos discrepantes. Esse comportamento pode ser observado pelo gráfico Boxplot (Figura 25). Mesmo os solos analisados sendo considerados como não afetados por componentes hidrofóbicos percebe-se pela Tabela A.3 que houve uma diferença estatística entre as áreas de acordo com o teste de médias de Tukey a 95% de confiabilidade, demonstrando uma tendência crescente dos dados do tempo de penetração da gota para área irrigada com efluente tratado (Figura 26).

Arye et al. (2011) avaliaram o comportamento da repelência à água em profundidade para solos arenosos em área de dunas em Israel que recebiam efluente tratado para irrigação. O ensaio de penetração da gota identificou que a camada superficial (0-5 cm) foi classificada como fortemente repelente à água, enquanto que nas camadas seguintes foram classificadas como levemente repelente a molhável. De acordo com os autores espera-se que a camada superficial apresente maior repelência devido ao maior teor de M.O e por estar exposta a processos de secagem do solo.

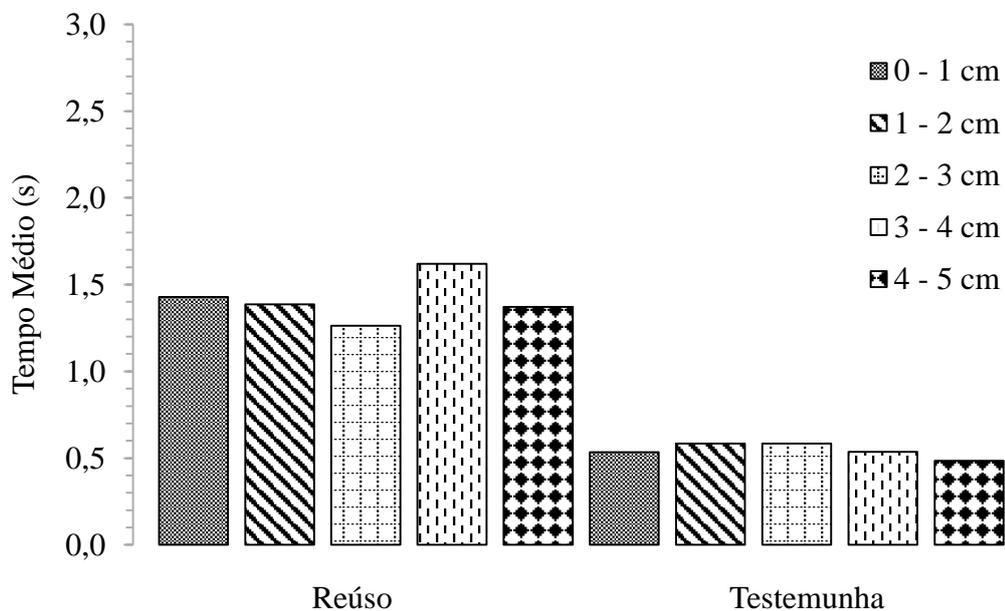
Figura 25. Representação gráfica, Boxplot, do tempo de penetração da gota para o solo com reúso e o solo testemunha.



Fonte: Autor.

O solo irrigado com efluente tratado apresentou valores médios, em profundidade, maiores para o tempo de penetração da gota em relação ao solo testemunha para todas as camadas analisadas como mostra a Figura 26. Esses valores corroboram com a premissa de que a indução à repelência à água provocada pelo uso de efluente. Essa mudança na camada superficial do solo poderia provocar alteração da taxa de infiltração e da condutividade hidráulica do solo, criar fluxos preferenciais e aumentar o risco de erosão do solo (RAHAV et al., 2017; ARYE et al, 2011; TRAVIS et al., 2010; WALLACH et al., 2005).

Figura 26. Valores médios do tempo de penetração da gota para cada 1 cm do solo com reúso e solo testemunha.



Fonte: Autor.

Apesar da repelência à água no solo ser considerada, pela literatura, uma propriedade física transitória Mataix-Soleira et al. (2011), afirmam que dependendo da qualidade, quantidade e tempo de aplicação do efluente no solo pode-se criar uma repelência à água por períodos prolongado. Os autores investigaram se o solo arenoso em clima mediterrâneo na Espanha, que foi irrigado com efluente de baixo grau de apuração durante 20 anos com uma aplicação de 6000mm/ano poderia recuperar-se de sua característica hidrofóbica. Os autores concluíram que mesmo após seis anos sem qualquer aplicação de reúso ou irrigação com água doce a camada superficial do solo (0-5 cm) de 2 hectares, ainda que apresentasse melhora, foi

classificada como classe III, fortemente repelente à água, sendo necessário medidas corretivas no solo para que a área pudesse voltar a ser cultivada.

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que a aplicação com efluente doméstico tratado para irrigação de um solo arenoso durante seis anos aumentou a densidade do solo, porosidade e teor de matéria orgânica, porém o aumento da M.O no solo com reúso não possibilitou uma melhor estruturação do solo nem aumento da capacidade de retenção de água.

O incremento de sódio no solo irrigado com efluente e conseqüentemente o aumento na razão de absorção do sódio se mostraram mais atuantes na modificação da estrutura e na dispersão de argila na camada superficial do solo. A dispersão de argila e aumento da RAS levaram a redução na retenção de água no solo e na condutividade hidráulica. De acordo com os dados obtidos houve redução na concentração de poros hidraulicamente ativos para a área de reúso modificando a dinâmica da água.

O solo irrigado apresentou menor taxa de infiltração, o que foi atribuído a dispersão de argila e mudança na estrutura dos poros devido ao aumento do sódio. O estudo em tela não identificou mudanças nas propriedades físicas e hídricas do solo após a aplicação de efluente por seis anos. As alterações na porosidade, condutividade hidráulica, retenção e matéria orgânica ficaram abaixo das alterações observadas em diversos trabalhos na literatura não apresentando diferença estatística entre a área de reúso e a testemunha. Isso foi atribuído ao fato da lâmina de irrigação ser pequena e concentrada em meses de seca, devido a cultura presente no solo, e ao fato do solo ser de textura mais arenosa, no qual ocorrem mudanças mais lentas em relação aos solos de texturas mais finas.

Os seis anos irrigação com efluente tratado não foram capazes de tornar o solo arenoso repelente a água, mas o resultado comparativo entre os dois solos mostrou diferença significativa no tempo de penetração da gota, mostrando que mesmo não repelente a água o solo com reúso apresenta mais componentes hidrofóbicos do que o solo testemunha. A classificação do solo como não repelente a água foi atribuída a baixa lâmina de irrigação aplicada e ao pequeno incremento de matéria orgânica.

O método Beerkan mostrou-se apropriado para modelar a infiltração tridimensional no campo, fornecendo valores aceitáveis de acordo com a literatura para solos com efluente e de textura arenosa. O dimensionamento dos parâmetros hídricos bem como as curvas de retenção e de condutividade hidráulica também mantiveram comportamentos aceitáveis de acordo com a literatura.

Enfim, seis anos de aplicação com efluente em um solo arenoso não alterou significativamente suas propriedades físico hídricas mas demonstra uma tendência ao incremento de sódio no solo bem como de repelência a água, sendo necessário um planejamento de irrigação e monitoramento contínuo para evitar mudanças permanentes da estrutura da camada superficial e na dinâmica da água no solo.

7. REFERÊNCIAS

ABDEL-SHAFY, H.I.; ABDEL-SABOUR, M.F. Wastewater Reuse for Irrigation on the Desert Sandy Soil of Egypt: Long-term Effect Integrated Urban. **Water Resources Management**. p. 301-312, 2006.

ABEGUNRIN, T.P.; AWE, G.O.; IDOW, D.O.; ADEJUMOBI, M.A. Impacto f wastewater irrigation on soil physico-chemical properties, growth and water use pattern of two indigenous vegetables in southwest Nigeria. **Catena**, v.139, p. 167-178, 2016.

ADHIKARI, P.; SHUKLA, M.L.; MEAL, J.G. Spatial variability of hydraulic conductivity and sodium content of desert soils: implications for management of irrigation using treated wastewater. **ASABE**, v.55, p.1711-1721, 2012.

AGUIAR, J. V.; LIBARDI, P.L.; SAUNDERS, L. C.U.; PAZ, V. P. S. Ajuste da equação de holtan modificada para um solo bruno não calcário da região seim-árida. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.2, n.3, p. 253-256, 1998.

ALVES, M. C.; SUZUKI, L. E. A. S. Influência de diferentes sistemas de manejo do solo na recuperação de suas propriedades físicas. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 26, n. 1, p. 27-34, 2004.

ARAÚJO, L. F. P. Reúso com lagoas de estabilização, potencialidade no Ceará. **SEMACE**, Fortaleza, p. 136, feb. 2000.

ARAÚJO FILHO, J. C.; RIBEIRO, M.R. Infiltração da água em cambissolos do baio Irecê (BA). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.363-370, 1996.

ARYE,G.; TARCHITZKY,J.; CHEN,Y. Treated wastewater effects on water repellency and soil hydraulic properties of soil aquifer treatment infiltration basins. **Journal of Hydrology**, v.397, n.1, p136-145, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1984) **NBR 7181: Solo – análise granulométrica**. Rio de Janeiro. 13p.

AZEVEDO, A. C. Verso e Reverso das Políticas Públicas de Água para o Semiárido Brasileiro. **Revista Política e Planejamento Regional**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 2, p. 373-392, Julh. 2015.

BECERRA-CASTRO, C.; LOPES, A.R.; VAZ-MOREIRA, I.; SILVA, E.F.; MANAIA, C.M. Wastewater reuse in irrigation: A microbiological perspective on implications in soil fertility and human and environmental health. **Environment International**. v.75, p.117-135, 2014.

BEDBABIS, S.; BEM ROUINA, B.; BOUKHRIS, M.; FERRARA, G. E. Effect of irrigation with treated wastewater on soil chemical properties and infiltration rate. **J. Environ Manage**. v.133, p.45-50, 2014.

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

BEN-HUR M. Sewage water treatmnts and ruse in Israel. **Water in the Middle East and in North Africa**, p.167-180, 2004

BISDOM, E.B.A.; DEKKER, L.W.; SCHOUTE, J.F.T. Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. **Geoderma**, v.56, p.105-118, 1993.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à Engenharia Ambiental**, 2. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2005.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Nova delimitação do Semiárido brasileiro**, Brasília, DF, p.32,2005

BRAUD, I. DE CONDAPPA, D.M. SORIA, J. HAVERKAMP, R. ANGULO-ARAMILLO, R. GALLE, S. VAUCLIN M. **Use of scaled forms of the infiltration equation for the estimation of unsaturated soil hydraulic properties (the Beerkan method)** Article first published online: 13 OCT 2004.

BROOKS, R.H.; COREY, A.T. **Hydraulic properties of porous media**. Hydrology Paper,v.3, Colorado State Univ. Fort Collins, 1964.

BURDINE, N. T. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. **American Institute Mining and Metallurgy Engineering**, v.198, p.71–77, 1953.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of Ametica Journal**, v.58, p.1501-1511, 1994.

CAPPOLA, A.; SANTINI, A.; BOTTI, P.; VACCA, S.; COMEGNA, V.;SEVERINO, G. Methodological approach for evaluating the response of soil hydrological behavior to

irrigation with treated municipal wastewater. **Journal of Hydrology**, v. 292, p. 114-134, 2004.

CASTELLINI, M.; DI PIRIMA, S.; IOVINO, M. An assessment of the BEST procedure to estimate the soil water retention curve: A comparison with the evaporation method. **Geoderma**, v. 320, p. 82-94, 2018.

CAVALCANTI, G. I. F. N. **Caracterização hidrodinâmica de solos de unidades geoambientais de Pernambuco a partir da metodologia Beerkan**. 2012. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

CAVALCANTI, M.C. **Estoque de carbono e nitrogênio sob diferentes usos do solo no semiárido brasileiro**. 2019. 64f. Dissertação (mestrado em engenharia ambiental) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

CAVENAGE, A.; MORAES, M. L. T.; ALVES, M. C.; CARVALHO, M. A. C.; FREITAS, M. L. M. e BUZETTI, S. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p.997-1003, 1999.

CHILDS, E. C.; COLLIS-GEORGE, C. The permeability of porous materials. Proceedings of the Royal Society of London. **Mathematical and Physical Sciences**, n. 201, p.392- 405, 1950.

CIRILO, J. A. et al. **O uso sustentável dos recursos hídricos em regiões semiárida. Recife**. ed. Universitária da UFRPE, 2007. 508p.

CODEVASF. **Inventário de projetos**. 3. ed. Brasília, DF, 223 p, 1999.

CONDAPPA, D.; SORIA UGALDE, J. M.; ANGULO-JARAMILLO, R.; HAVERKAMP, R. 2002. Méthode Beerkan. Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des sols non saturés. **Rapport interne Hydrologie de la Zone Non Saturés** - LTHE, Grenoble: Université de Grenoble, 82p, 2002.

DEBANO, F.L. Water repellency in soils: a historical overview. **Journal Hydrology**, v.231-232, p.4-32, 2000.

DOER, S.H.; THOMAS, A.D. The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal, **Journal Hydrology**, v.231-232, p. 134-147, 2000.

ELGALLAL, M.; FLETCHER, B. Assessment of potential risks associated with chemicals in wastewater used for irrigation in arid and semiarid zones: a review. **Agriculture and water management**, v. 177, p.419-431, 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1979.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Palma Forrageira no Nordeste do Brasil**: Estado da Arte. 1.ed. Ceara: EMBRAPA, 2012

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 3. ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017.

FARHADKHANI, M., NIKAEEN, M., YADEGARFAR, G., HATAMZADEH, M., POURMOHAMMADBAGHER, H., SAHBAEI, Z., & RAHMANI, H. R. Effects of irrigation with secondary treated wastewater on physicochemical and microbial properties of soil and produce safety in a semi-arid area. **Water Research**. v. 144, p. 356 - 364, 2018.

FEINERMAN, E.; TSUR, Y. Perennial crops under stochastic water supply. **Agricultural Economics**, v.45, n.6, p.757–766, 2014.

FEITOSA, F. A. C. et al. (2008) *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3ª. Ed. CPRM, Rio de Janeiro, 812p.

FONSECA, A.F.; HERPIN, U.; DE PAULA, A.M.; VICTÓRIA, R.L.; MELFI, A.J. Agricultural use of treated sewage effluents: agronomic and environmental implications and perspectives for Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, p. 194-209, 2007.

FRANÇA NETO, J.M.; COUTINHO, A.P.; BEZERRA, S.T.M.; BARROS, V.H.O.; ALVES, A.T.A. Utilização da metodologia Beerkan para determinação de propriedades hidrodinâmicas do solo: Aplicações no Nordeste Brasileiro. **XVI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2018a**.

FRANÇA NETO, J. M. **Variabilidade espacial das propriedades hidrodinâmicas de um solo com vegetação de caatinga**. 2018b. 85f. Dissertação (mestrado em engenharia civil e ambiental). Universidade Federal de Pernambuco Caruaru.

FUENTES, C. Approche fractale des transferts hydriques dans les sols non-saturés. Grenoble: Université Joseph Fourier. 444p. Tese Doutorado, 1992.

FUENTES, C., M. VAUCLIN, J.-Y. PARLANGE, AND R. HAVERKAMP. **Soil water conductivity of a fractal soil**. p. 333–340. In P. Baveye *et al.* (ed.) *Fractals in soil science*. Lewis Publisher, Boca Raton, FL. 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, p.228-232, 1958.

GHARAIBEH, M.A; ELTAIF, N.I.; AL-ABDULLAH, B. Impacto of field application of treated wastewater on hydraulic properties of vertisols. **Water Air and Soil Pollution**, v.184, p.347-353, 2007.

GIULIETTI, A. M.; CONCEIÇÃO, A.; QUEIROZ, L. P. de. Diversidade e caracterização das fanerógamas do Semiárido brasileiro. **Associação Plantas do Nordeste**, Recife, p.488, 2006.

GONÇALVES, R.A.B.; GLOAGUEN, T.V.; FOLEGATTI, M.V.; LIBARDI, O.L.; LUCAS, Y.; MONTES, C, R. Distribuição do tamanho de poros em solos irrigados com água sódica e esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.3, p.701-707, 2010.

GONÇALVES, A.D.M.A.; LIBARDI, P.L. 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.

HALLETT, P.D.; RITZ, K. Microbial derived water repellency in golf course soil. **International Turfgrass Society**, n.65, p.518-524, 2001.

HALLIWEL, D.J.; BARLOW, K.M.; NASH, D.M. A review of the effects of wastewater sodium on soil physical properties and their implications for irrigation systems. **Soil Research**, v.39, p.1259-1267, 2001.

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.; ROSS, P.J.; SMETTEM, K.R.J.; PARLANGE, J.Y. Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. **Water Resources Research**, v.30, p.2931-2935, 1994.

HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J. Y.; CUENCA, R.; ROSS, P. J.; STEENHUIS, T.S. 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, 1998.

HUBBELL, D.H. Developmental aspects of waater-repellency of Sandy soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.52, p.1512-1514, 1988.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2010: Síntese de indicadores**. Rio de Janeiro: IBGE,2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico IBGE: Síntese de indicadores**, Santana do Serindó: IBGE, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores IBGE: contas nacionais trimestrais, indicadores de volume e valor corrente**, 2017.

INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO. INSA 2016: **Boletim informativo do Instituído Nacional do Semiárido**. Ano IV, n.7, p.1, 2016.

JACOMINE, P. T. K. Solos sob caatinga: características e uso agrícola. In: ALVAREZ V., V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. O solo nos grandes domínios morfoclimaticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 96-111, 1996.

JARAMILLO, R. A.; BAGARELLO, V.; DI PRIMA, S.; GOSSET, A.; LOVINO, M.;

- JIMÉNEZ, E.I. & GARCIA, V.P. Relationships between organic carbon and total organic matter in municipal solid wastes and city refuse composts. **Bioresource Technology**, v.41, p.265- 272, 2019.
- JIMÉNEZ, E.I. & GARCIA, V.P. Relationships between organic carbon and total organic matter in municipal solid wastes and city refuse composts. **Biores. Technol.**, v. 41, p. 265-272, 1992.
- JUESCHKE, E.; MARSCHNER, B.; TARCHUTZKY, J.; CHEN, Y. Effects of treated wastewater irrigation on the dissolved and soil organic carbon in Israeli. **Soil Water Science**, v.57, p.727-733, 2008.
- KAUR, B.; SIDHU, R.; VATTA, K. Optimal crop plans for sustainable water use in Punjab. **Agricultural and Economic**, v. 23, p. 273-284, 2010.
- KURIAN, M.; REDDY, V.R.; DIETZ, T.; BRDJANOVIC, D. Wastewater re-use for peri-urban agriculture: a viable option for adaptive water management **Sustainability Science**, v.8, n.1, p.47-59, 2013.
- LADO, M.; BEM-HUR, M. Treated domestic sewage irrigation effects on soil hydraulic properties in arid and semiarid zones: A review. **Soil and Tillage Research**, v.106, n.1, p.152-163, 2009.
- LADO, M.; BEM-HUR, M.; ASSOULINE, S. Effects of effluent irrigation on seal formation, infiltration, and soil loss during rainfall. **Soil Science Society of America Journal**, v.69, p.1432-1439, 2005.
- LASSABATERE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R.; SORIA, 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.
- LEIGHTON-BOYCE, G.; DOERR, S.H.; SHAKESBY, R.A.; WALSH, R.P.D.; FERREIRA, A.J.D.; BOULET, A.K.; COELHO, C.O.A. Temporal dynamics of water repellency and soil moisture in eucalypt plantations, Portugal. **Australian Journal of Soil Research**, v.43, p.269-280, 2005.
- LEMOS, M. **Uso de esgoto tratado para produção de palma forrageira em assentamento rural do semiárido brasileiro**. 2016. 244 f. Tese (Doutorado em manejo de solo e água) - Universidade Federal Rural do Semiárido, Rio Grande do Norte.
- LEUTHER, F.; WELLER, U.; WALLACH, R.; VOGEL, H. J. Quantitative analysis of wetting front instabilities in soil caused by treated waste water irrigation. **Geoderma**. v. 319, p.132-141, 2018.
- LEUTHER, F.; SCHUTER, S.; WALLACH, R.; JORG-VOGEL. Structure and hydraulic properties in soils under long-term irrigation with treated wastewater. **Geoderma**, v.333, n.1, 2019.
- LEVY, G.J. Impact of long-term irrigation with treated wastewater on soil-structure stability: The Israeli experience. **Israel J. Plant Sci.**, v. 59, p. 95–104, 2011.

LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. São Paulo: Editora Universidade de São Paulo. 2005

LIBARDI, P. L. & MELO FILHO, J. F. Análise exploratória e variabilidade dos parâmetros da equação da condutividade hidráulica, em um experimento de perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 30, p.197 - 206, 2006.

LIMA, J. A. G.; MENDES, A. M. S.; DUDA, G. P.; FERREIRA, C. V. Variabilidade espacial de características físico-hídricas de um Cambissolo cultivado com mamão no semi-árido do RN. **Caatinga**, v.19, n.2, p.192-199, 2006.

MARCOLIN, C. D. **Propriedades físicas de nitossolos e latossolos argilosos sob plantio direto**. 2006. 110f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul.

MARINHO, L.E.O.; TONETTI, A.L.; STEFANUTTI, R.; CORAUCCI FILHO, B. Application of reclaimed wastewater in the irrigation of rosebushes. **Water Air Soil Pollution**, v. 224, p.1669, 2013.

MARQUARDT D. W. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. **Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics**, v. 11, n. 2, p. 431 - 441, 1963.

MATAIX-SOLERA, J.; DOER, S.H. Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoil from fire affected pine forests in southeastern Spain. **Geoderma**, n.118, p.77-88, 2004.

MATAIX-SOLERA, J.; GARCÍA-IRLES, L.; MORUGÁN, A.; DOERR, S.H.; GARCIA-ORENES, F.; ARCENEGUI, V.; ATANASSOVA, I. Longevity of soil water repellency in a former wastewater disposal tree stand and potencial amelioration. **Geoderma**, v.165.n1.p.78-83, 2011.

MOHAMMED, S. ABD-ELWAHED. Influence of long-term wastewater irrigation on soil quality and its spatial distribution. **Annals of agricultural sciences**, v.63, n.2, p.191-199, 2018.

MOHAMMED, S.; ABD-ELWAHED. Effect of long-term wastewater irrigation on the quality of alluvial soil for agricultural sustainability. **Annals of agricultural sciences**. v. 64, p.151-160, 2019.

MOJIRI, A. Effects of municipal wastewater on physical and chemical properties of saline soil. **J. Biol. Environ. Sci.** v.5, p. 71-76, 2011.

MOLAHOSEINI, H. Long-Term Effects of Municipal Wastewater Irrigation on Some Properties of a Semiarid Region Soil of Iran. **International Journal of Agronomy and Agricultural Research**. v.4, p.1023-1028, 2013.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, v.12, p.513-522, 1976.

MURABAK, I.; MAILHOL, J. C.; JARAMILLO, R. A.; RUELLE, P.; BOIVIN, P.; KHALEDIAN, M. Temporal variability in soil hydraulic properties under drip irrigation. **Geoderma**, v. 150, p. 158-165, 2009.

NADAV, I.; TARCHITZKY, J. Water repellency induced by organic matter (OM) in treated wastewater (TWW) infiltration ponds and irrigation. **Functions of Natural Organic Matter in Changing Environment**. Netherlands, p.883-887, 2013.

NAWAL, A.; MOHAMED, K.; TAMRABET, L.; ADDAD, D.; HALLAIRE, V.; OULDJAOU, A. Long-term effects of wastewater reuse on hydro physicals characteristics of grassland grown soil in semi-arid Algeria. **Jornal of king saud university- Science**, v.32, n. 1, p. 1004-1013, 2020.

NAZARI, B.; ABDOLMAJID, L.; REZA, A. M.; MARZEH, K. Irrigation water management in Iran: Implications for water use efficiency improvement. **Agriculture water management**, v. 208, p. 7-18, 2018.

OLIVEIRA, D. M. de et al. Caracterização Morfológica e Agronômica de Variedades de Arroz Vermelho em Sistema de Produção Agroecológica. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 4, n. 2, 2009.

OLIVEIRA, J.A.S. **Propriedades hidrodinamica de um neossolo regolitico sob pastagem e caatinga no agreste Pernambucano**. 2012. 97f. Dissertação (mestrado em produção Agrícola) – Universidade Federal de Pernambuco, Garanhuns.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **População mundial projetada para 2050**, 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/populacao-mundial-deve-chegar-a-97-bilhoes-de-pessoas-em-2050-diz-relatorio-da-onu/amp/>. Acesso em: 25 out.2018.

ORGANISATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT. **Water resources allocation: sharing risks and opportunities**. OECD Publishing, Paris, 2015.

OTTONI, M.V. **Classificação físico-hidrica de solos e determinação da capacidade de campo in situ a partir de testes de infiltração**. 2005. 156f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PAGANINI, W. S. (2003). **Reúso de água na agricultura**. In: *Reúso de água*. Editores: Pedro Caetano Sanches Mancuso e Hilton Felício dos Santos. Barueri, SP: Manole. Universidade de São Paulo, Faculdade de Saúde Pública, Núcleo de Informações em Saúde Ambiental. (339-402) p.

PEREIRA, B.F.F., HE, Z.L., SILVA, M.S., HERPIN, U., NOGUEIRA, S.F., MONTES, C.R., MELFI, A.J. Reclaimed wastewater: impact on soil-plant system under tropical conditions. **J. Hazard. Mater**, v. 192, p. 54–61, 2011.

PERROUX, K. M.; WHITE, I. Designs for disc permeameters. **Soil Science Society of America, Journal**, Madison, v.52, p.1205-1215, 1988.

- PETERSEN, G. W.; CUNNINGHAM, R. L.; MATELSKI, R. P. Moisture characteristics of Pennsylvania soils. II. Soil factors affecting moisture retention within a textural class-Silt Loam. **Soil Science Society American Proceedings**, Madison, v. 32, n. 6, p. 866-870, 1968.
- PHILIP, J.R. The quasi-linear analysis, the scattering analog, and other aspects of infiltration and seepage. In: Fok, Y. S. ed. Infiltration development and application. Honolulu: **Water Resources Research Center**, p.1-27, 1987.
- QADIR, M.; WICHELS, D.; RASCHID-SALLY, L. The challenges of wastewater irrigation in developing countries. **Agricultural water management**, v.97, p.561-568, 2010.
- RABELO, N. A. **Método de Análise** – Goiânia: Cadernos didáticos, Ed. UCG, 88p, 2000.
- RONCO, P. et al. A risk assessment framework for irrigated agriculture under climate change. **Water Resource**, v. 110, p. 562-578, 2018.
- RAHAV, M.; BRINDT, N.; YERMIYAHU, U.; WALLACH, R. Induced heterogeneity of soil water content and chemical properties by treated wastewater irrigation and its reclamation by freshwater irrigation. **Water Resources Research**, n.53, p.4756-4774, 2017.
- REBOUÇAS, C. A. M. **Condutividade hidráulica do solo a partir da curva de retenção de laboratório e de campo**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2016.
- REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole. 478p, 2004.
- REIS, L. B.; FADIGAS, E. A. A.; CARVALHO, C. E. Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento sustentável. p.16-57. Barueri: manole, 2005.
- RENGASAMY, P. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils *funct Plant. Biology*, v.37, p.613-620, 2010.
- RICHARDS, L.A et al. Physical processes determining water loss from soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.20, p.310-314, 1965.
- ROCHA, W. F. Situação da cobertura vegetal do bioma Caatinga. In: ANGELOTTI, F.; SÁ, I.B.; MENEZES, E. A.; Pellegrino, G. Q. (Org.). Mudanças climáticas e desertificação no Semiárido brasileiro. **Petrolina: Embrapa Semiárido; Campinas: Embrapa Informática Agropecuária**. cap. 5, p.77-94, 2009.
- SANTOS, C. A. G; SILVA, J. F. C. B. C; SILVA, R. M. da. Caracterização hidrodinâmica dos solos da bacia experimental do riacho Guaraira utilizando o método Beerkan. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 4, p. 149-160, 2012.
- SANTOS, K. et al. Análise espacial de dados de precipitação pluvial no agreste pernambucano. In: II Inovagri Internacional Meeting. [S.l.: s.n.]. Fortaleza, 2014.
- SILVA, L. D.; MONTENEGRO, A. A. A. MONTENEGRO, S. M. G. L.; CARNEIRO, T. F. T.; SILVA, J. R. L.; MOURA, A. E. S. S.; OLIVEIRA, L. M. M. Análise comparativa de precipitação, temperatura, e evapotranspiração entre bacias representativas do agreste de Pernambuco. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS-ABRH,20.,2013, Bento Gonçalves. **Anais [...]**. Bento Gonçalves-RS, 2013.

SILVA, J. J. N.; MONTENEGRO A. A. A.; SILVA, F. F.; FONTES JÚNIOR R. V. P.; SILVA, A. P. N. Variabilidade espacial de parâmetros de crescimento da mamoneira e de atributos físico-químicos em Neossolo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, v.14, n.9, p.921–931, 2010.

SILVA, J. F. C. B. C. **Análise espacial das características hidrodinâmicas e do uso e ocupação do solo da bacia eperimental do riacho Guaraíra mediante o uso de geotecnologias**. 2009. 85f. Dissertação (Mestrado em engenharia urbana e ambiental)- Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

SILVA, M. J.; GALVÍNCIO, J. D.; COSTA, V. S. O. Abordagem interdisciplinar sobre a influência da zona de convergência intertropical- ZCIT no nordeste brasileiro. *Revista Movimentos Sociais & Dinâmicos Espaciais*, v. 6, n.2, p.11, 2017.

SILVA E SILVA, A.N. Reúso de água no Distrito Federal: Verificação dos efeitos da irrigação com efluentes de estações de tratamento de esgoto no cultivo da Dália Anã sortida (*Dahlia pinnata*). 2004. 210f. Dissertação (Mestrado em tecnologia ambiental e recursos hídricos) – Distrito Federal.

SILVEIRA, A.L.; LOUZADA, J.A.; BELTRAME, L.F. Infiltração e armazenamento no solo. In: TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: Ed. Universidade: ABRH, EDUSP, p.335- 372, 2000.

SIQUEIRA, H. R.; VIEIRA NETO, J. F.; GUIMARÃES, E. C.; TAVARES, M. Uso de semivariograma escalonado para comparar a distribuição espaço-temporal da precipitação anual no estado de Minas Gerais. **Famat em Revista**, Minas Gerais, v.7, n.7, p. 17-28, 2006.

SNEL, M. Reuse of wastewater: its advantages and disadvantages specifically from an institutional and socio-cultural perspective. **Delft**: The Netherlands: International water and sanitation centre, 2002.

SOUZA, E. S. **Caracterização hidrodinamica na escala local e da parcela Agrícola de dois solos do estado da Paraíba: variabilidade espacial e temporal, e meio homogêneo equivalente**. 2005. 138p. Tese (Doutorado em ciências-Física do solo) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

SOUZA, E. S; ANTONINO, A. C. D; NETTO, A. M; CABRAL, J. J. S. P; JARAMILLO, R. A; ROULIER, S. Análise do Regime Transitório da Infiltração Tridimensional sob Sucção Controlada. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v 11, n.1, p. 5-13, 2006.

SOUZA, E. S; ANTONINO, A. C. D; LIMA, J. R; NETO, G. C. G; SILVA, J. M; SILVA, I. F. Efeito do encrostamento superficial nas propriedades hidráulicas de um solo cultivado. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.2, n.1, p.69-74, 2007.

SOUZA, E. S.; ANTONINO, A.C.D.; JARAMILLO, R.A.; NETTO, A.M.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; SILVA, E.B. Variabilidade espacial dos parâmetros hidrodinâmicos de duas parcelas agrícolas no estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 5, p. 1795-1804, 2008a.

- SOUZA, E. S. ANTONINO, A.C.D.; JARAMILLO, R.A. NETTO, A.M. Caracterização hidrodinâmica de solos: Aplicação do método Beerkan1. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 128-135, 2008b.
- SPERA, S.T.; DENARDIN, J.E.; ESCOSTEGUY, P. A.V.; SANTOS, H.P.; FIQUEROA, E.A. Dispersão de argila em microagregados de solo incubados com calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.2613-2620, 2008.
- TARCHOUNA, L.G.; MERDY, P.; RAYNAUD, M.; PFEIFER, H. R.; LUCAS, Y. Effects of long-term irrigation with treated wastewater. Part I: Evolution of soil physico-chemical properties. **Applied Geochemistry**, v.25, n.11, p.1703-1710, 2010.
- TAVARES, S.R.L, Coord. **Curso de recuperação de áreas degradadas: a visão da Ciência do Solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 228 p, 2008.
- TEIXEIRA, L. P. **Caracterização hidrológica dos solos da bacia experimental do ribeirão Concórdia**. 2008. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau.
- THWAITES, L.A.; ROOIJ, G.H.; SALZMAN, S.; ALLISON, G.; STAGNITTI, F.; CARR, R.; VERSACE, V.; STRUCK, S.; MARCH, T. Near-surface distribution of soil water and water repellency under three effluent irrigation schemes in a blue gum (*Eucalyptus globulus*) plantation. **Agricultural Water Management**, n.86, p.212-219, 2006.
- TRAVIS, M.J.; WIEL-SHAFRAN, A.; WEISBRAD, N.; ADAR, E.; GROSS, A. Greywater reuse for irrigation: effects on soil properties. **Science of the Total Environment**, v.408, p.2501-2508, 2010.
- TRENTIN, C. V. **Diagnóstico voltado ao planejamento do uso de águas residuárias para irrigação nos cinturões verdes da região metropolitana de Curitiba**. 2005. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: ABRH. 944p, 2009.
- TUNC, T.; SAHIN, U. The changes in the physical and hydraulic properties of a loamy soil under irrigation with simpler-reclaimed wastewaters. **Agricultural Water Management**, v.158, p.213-224, 2016.
- URBANO, V.R.; MENDONÇA, T.G.; BASTOS, R.G.; SOUZA, C.F. Effects of treated wastewater irrigation on soil properties and lettuce yield. **Agricultural Water Management**, v.181, p.108-115, 2017.
- VAN GENUCHTEN, M.TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p.892-898,1980.
- VARALHO, A.C.T.; CARVALHO, L.; SANTORO, B.L.; SOUZA, C.F. Alterações nos atributos de um Latossolo Vermelho-amarelo irrigado com água de reúso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, v.14, n.4, 2010.

- VARALLO, A.C.T.; SOZA, C.F.; SANTORO, B.L. Mudanças nas características físico-químicas de m latossolo vermelho – amarelo distrófico após irrigação com água de reúso na cultura da alfaca-crespa (*Lactuca sativa*, L.). **Engenharia agrícola Jaboticabal**, v.32, n.2, p.271-279, 2012.
- VOGELER, I. Effect of Long-term Wastewater Application on Physical Soil Properties. **Water Air Soil Pollut**, v.196, p.385–392, 2009.
- WALLACH, R.; BEM-ARIE, O.; GRABER, E.R. Soil water repellency induced by long-term irrigation with treated sewage effluente. **Journal of Environmental Quality**. n. 34, p.1910-1920, 2005.
- WALLIS, M.G.; HORNE, D.J. Soil water repellency. **Open Journal of Soil Science**, v.20, p.91-140, 1992.
- WANG, Y.Q.; SHAO, M.A. Spatial variability of soil physical properties in a region of the loess plateau of PR China subjected to wind and water erosion. **Land Degradation & Development**, v.24, p.296-304, 2013.
- WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. Applications of soil physics. New York, Academic Press, p.319-344., 1980.
- WHITE, I.; SULLY, M. J. Macroscopic and microscopic capillary length and times scales from field infiltration. **Water Resources Research**, v.23, n.8, p.1514-1522, 1987.
- WOCHE, S.K.; GOEBEL, M.O.; KIRKHAM, M.B.; HORTON, R. PLOEG, R.V.D. Contact angle of soils as affected by depth, texture, and land management. **European Journal of Soil Science**, v.56, n.2, p.239-251, 2005.
- XU, X.; KIELY, G.; LEWIS, C. Estimation and analysis of soil hydraulic properties through infiltration experiments: comparison of BEST and DL fitting methods. **Soil use and Management**, v. 25, n. 4, p. 354-361, 2009.
- YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Commun. Soil Sci. Plant. Anal.*, 19:1467-1476, 1988.
- 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**, 13, Zacatecas. Resumos ...Zacatecas: ANEI, 2003. Desarrollo y transferencia de tecnología de riego y drenaje, v.2, p.212-219., 2003.
- ZHANG, R.; VAN GENUCHTEN, M.Th. New models for unsaturated soil hydraulic properties. **Soil Science**, v.158, p.77-85, 1994.
- ZHIPENG, L.; RAHAV, M.; WALLACH, R. Spatial variation of soil water repellency in a comercial orchard irrigated with treated wastewater. **Geoderma**, v.333, p214-224, 2019.
- ZUPANC, V.; ZUPANCIC, M. Changes in soil characteristics during landfill leachate irrigation of *Populus deltoids*. **Waste Management**, n.30, p. 2130-2136, 2010.

APENDICE A- ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Tabela A.1. Teste de médias (Tukey, 5%) para partículas do solo

	Argila (dag.kg ⁻¹)	Silte (dag.kg ⁻¹)	Areia (dag.kg ⁻¹)
Reúso	2,582 a	18,061 a	79,357 a
Testemunha	3,754 a	15,833 b	80,414 a
Pr >F(Modelo)	0,05636716	0,006	0,102
Significativo	Não	Sim	Não
Pr >F(Tratat)	0,05636716	0,006	0,102
Significativo	Não	Sim	Não

Tabela A.2. Teste de médias (Tukey, 5%) para densidade do solo, porosidade, Umidade inicial e final.

	ρ_s (g.cm ⁻³)	ϕ (cm ³ .cm ⁻³)	θ_i (cm ³ .cm ⁻³)	θ_f (cm ³ .cm ⁻³)
Reúso	1,596 a	40,871 a	9,885 a	30,896 a
Testemunha	1,558 a	40,8098 a	6,214 b	29,418 a
Pr >F(Modelo)	0,22	0,511	0,024	0,287
Significativo	Não	Não	Sim	Não
Pr >F(Tratat)	0,22	0,511	0,024	0,287
Significativo	Não	Não	Sim	Não

Tabela A.3. Teste de médias (Tukey, 5%) para repelência à água, carbono orgânico total e matéria orgânica.

	Tempo de penetração da gota no solo (s)	COT (g.kg ⁻¹)	M.O (g.kg ⁻¹)
Reúso	1,414 a	3,773 a	6,505 a
Testemunha	0,544 b	3,301 a	5,691 a
Pr >F(Modelo)	< 0.0001	0,13	0,13
Significativo	Sim	Não	Não
Pr >F(Tratat)	< 0.0001	0,13	0,13
Significativo	Sim	Não	Não

Tabela A.4. Teste de médias (Tukey, 5%) para os parâmetros de forma (m, n e η).

	m	n	η
Reúso	0,151 a	2,356 a	8,635 a
Testemunha	0,155 a	2,368 a	8,445 a
Pr >F(Modelo)	0,217	0,22	0,201
Significativo	Não	Não	Não

Pr >F(Tratat)	0,217	0,22	0,201
Significativo	Não	Não	Não

Tabela A.5. Teste de médias (Tukey, 5%) para os parâmetros S, θ_s Ks, hg.

	S (mm.s ^{-0,5})	θ_s (cm.cm ⁻³)	Ks (mm.s ⁻¹)	hg (mm)
Reúso	0,455 b	0,409 a	0,019 a	-26,248 a
Testemunha	0,995 a	0,401 a	0,031 a	-76,606 b
Pr >F(Modelo)	<0.0001	0,508	0,171	0,01
Significativo	Sim	Não	Não	Sim
Pr >F(Tratat)	<0.0001	0,508	0,171	0,01
Significativo	Sim	Não	Não	Sim

Tabela A.6. Teste de médias (Tukey, 5%) para escalas características (m, n e η)

	λ_m (mm)	λ_c (mm)	C λ_m (N°. de poros.m ⁻²)
Reúso	0,158b	72,673a	110743,018a
Testemunha	0,853 a	22,525b	1161,955 a
Pr >F(Modelo)	0,043	0,009	0,105
Significativo	Sim	Sim	Não
Pr >F(Tratat)	0,043	0,009	0,105
Significativo	Sim	Sim	Não