

AGNES CAMILA NASCIMENTO DA FONSECA

VARIABILIDADE ESPAÇO TEMPORAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO
SOLO SOB MANEJO CONSERVACIONISTA NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO

Recife - Pernambuco

2022

AGNES CAMILA NASCIMENTO DA FONSECA

VARIABILIDADE ESPAÇO TEMPORAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICO DO
SOLO COM MANEJO CONSERVACIONISTA NO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro

Coorientador: Prof. Dr. Edivan Rodrigues de Souza

Recife - Pernambuco

2022

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

F676v

da Fonseca, Agnes Camila Nascimento

Variabilidade espaço temporal dos atributos físicos e químicos do solo sob manejo conservacionista no semiárido pernambucano. / Agnes Camila Nascimento da Fonseca. - 2022.
122 f. : il.

Orientador: Abelardo Antonio de Assuncao Montenegro.

Coorientador: Edivan Rodrigues de Souza.

Inclui referências.

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

1. Déficit hídrico. 2. Conservação ambiental. 3. Cobertura morta. 4. Geoestatística. 5. Manejo de água e solo. I. Montenegro, Abelardo Antonio de Assuncao, orient. II. Souza, Edivan Rodrigues de, coorient. III. Título

AGNES CAMILA NASCIMENTO DA FONSECA

**VARIABILIDADE ESPAÇO TEMPORAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICO
DO SOLO SOB MANEJO CONSERVACIONISTA NO SEMIÁRIDO
PERNAMBUCANO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

DEFENDIDA e APROVADA em 29/04/2022.

Orientador:

Abelardo Antônio de Assunção Montenegro - UFRPE

Coorientador:

Edivan Rodrigues de Souza - UFRPE

Examinadores:

José Roberto Lopes da Silva - UFRPE/ UABJ- Membro Externo

Simone Rosa da Silva – POLI/ UPE- Membro Externo

“Finalmente, irmãos, tudo o que for verdadeiro, tudo o que for nobre, tudo o que for correto, tudo o que for puro, tudo o que for amável, tudo o que for de boa fama, se houver algo de excelente ou digno de louvor, pensem nessas coisas.” Filipenses 4.8

Dedico este trabalho aos meus pais Irani Nascimento e Sylvio Fonseca (in memoriam), aos meus irmãos Andréa Fonseca e Sylvio Fonseca JR. pelo amor, companheirismo e por serem meus maiores incentivadores.

Agradecimentos

Ao final desse mestrado só tenho a agradecer a Deus, em primeiro lugar, pelo seu amor, por ter me proporcionado essa graça em tempos tão difíceis de COVID-19 e pela capacitação. Aos meus pais Irani Nascimento e Sylvio Fonseca (*in memoriam*), por estabelecerem uma base sólida, um lugar de acolhimento, amor, proteção, apoio e incentivo. Aos meus irmãos Andréa Fonseca e Sylvio Fonseca JR., que acreditaram em minhas habilidades e sempre demonstraram carinho e amor.

À Glícia Rafaela, amiga querida que me recebeu em Parnamirim-PE, agradeço a hospitalidade e ao auxílio em campo, sendo meu braço direito nessa jornada.

Aos meus amigos Symone Falcão e Eric Fernandez que desde a graduação me acompanham, sendo uma das partes fundamentais para a minha formação acadêmica.

À Gabriela Martins, por tornar as noites de estudo mais agradáveis e produtivas.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Abelardo Montenegro, pela colaboração.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEA/ UFRPE), por todo o apoio e estrutura oferecidos. A todos os professores, alunos e funcionários. Aos amigos que fiz Ralison Silva, Aline Chagas, Thayná Almeida, Ailton Carvalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior – CAPES, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Pernambuco – FACEPE pelos apoios financeiro e institucional. Ao programa Reúse do Mestrado e Doutorado Acadêmico para Inovação (MAI/DAI) e todas as pessoas e instituições que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta pesquisa, em especial ao Instituto Nacional do Semiárido (INSA), a Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) e a TPF Engenharia.

Meu muito obrigada, nada disso seria possível sem vocês.

“Ame muitas coisas, pois aí está a verdadeira força, e quem ama muito, muito realiza e pode realizar muito, e o que é feito com amor é bem-feito.”

Van Gogh

Fonseca, A. C. N. **Variabilidade espaço temporal dos atributos físicos e químico do solo sob manejo conservacionista no semiárido pernambucano**. 2022. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.

Resumo geral

O semiárido é marcado pela variabilidade espaço-temporal das precipitações, temperaturas altas, ocasionando um *déficit* hídrico. A estimativa do balanço hídrico é de grande relevância em termos agrícolas, pois envolve a caracterização das condições hídricas existentes em que a cultura se desenvolve. As práticas conservacionistas do solo estão diretamente ligadas à conservação ambiental e à eco-hidrologia, além de contribuir para o desenvolvimento agrícola, social e econômico, cooperando com desenvolvimento adequado da fauna e da flora. A cobertura morta na superfície do solo o protege da salinização, da erosão e reduz a evaporação, permitindo que a cultura tenha uma disponibilidade hídrica maior. Aliado ao que foi proposto, o objetivo dessa Dissertação é promover uma análise físico-química e hidráulica de uma área agrícola a ser manejada com técnicas conservacionistas de solo e irrigada com água de reúso de efluente tratado, aplicando técnicas de agricultura de precisão, como uma alternativa de melhor convivência com a escassez hídrica da região semiárido. O estudo ocorreu em Parnamirim-PE, a área experimental está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Brígida. Avaliou-se propriedades hidráulicas do solo, salinidade, estoque de carbono orgânico e umidade com o uso de sensores da FALKER HidroFarm. O uso da geoestatística possibilitou constatar a ausência de dependência espacial para a condutividade hidráulica e o método do Beerkan se mostrou eficiente para a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do solo. Para a área de estudo recomenda-se o uso de práticas conservacionistas, a fim de se obter uma maior eficiência na irrigação e aumentar o aporte de carbono orgânico no solo, aliado ao cultivo de culturas que seja resistentes a salinidade. A utilização de sensores FALKER HidroFarm apresentou adequado desempenho, apesar das dificuldades associadas às propriedades físicas deste solo. Pesquisas futuras poderão contribuir para um melhor entendimento da relação entre condutividade hidráulica e manejo do solo, tendo em vista que esta dissertação servirá como um estudo preliminar sobre a variabilidade espacial das variáveis analisadas a fim de utilizar abordagens conservacionistas que auxiliem na melhoria da convivência no semiárido.

Palavras-chaves: Déficit hídrico; Evapotranspiração; Conservação ambiental; Cobertura morta; Geoestatística.

Fonseca, A. C. N. **Spatio-temporal variability of soil physical and chemical attributes under conservation management in the semi-arid region of Pernambuco**. 2022. 122f. Dissertation (Master in Agricultural Engineering) - Federal Rural University of Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brazil.

General abstract

The semiarid is marked by spatio-temporal variability of precipitation, high temperatures, causing a water deficit. The estimation of the water balance is of great relevance in agricultural terms, as it involves the characterization of the existing water conditions in which the crop develops. Soil conservation practices are directly linked to environmental conservation and eco-hydrology, in addition to contributing to agricultural, social and economic development, cooperating with the proper development of fauna and flora. Mulching on the surface of the soil protects it from salinization, erosion and reduces evaporation, allowing the crop to have greater water availability. Allied to what has been proposed, the objective of this dissertation is to promote a physical-chemical and hydraulic analysis of an agricultural area to be managed with soil conservation techniques and irrigated with reused water from treated effluent, applying precision agriculture techniques, such as a alternative for better coexistence with the water scarcity of the semi-arid region. The study took place in Parnamirim-PE, the experimental area is located in the Brígida River Basin. Soil hydraulic properties, salinity, organic carbon stock and moisture were evaluated using FALKER HidroFarm sensors. The use of geostatistics made it possible to verify the absence of spatial dependence for the hydraulic conductivity and the Beerkan method proved to be efficient for the determination of the hydrodynamic parameters of the soil. For the study area, the use of conservation practices is recommended, in order to obtain greater efficiency in irrigation and increase the contribution of organic carbon in the soil, combined with the cultivation of cultures that are resistant to salinity. The use of FALKER HidroFarm sensors showed adequate performance, despite the difficulties associated with the physical properties of this soil. Future research may contribute to a better understanding of the relationship between hydraulic conductivity and soil management, considering that this dissertation will serve as a preliminary study on the spatial variability of the variables analyzed in order to use conservationist approaches that help to improve coexistence in the semiarid region.

Keywords: Water deficit; Evapotranspiration; Environmental Conservation; mulch; Geostatistics.

Sumário

CAPÍTULO I	15
1 INTRODUÇÃO	15
2 HIPÓTESES	16
3 OBJETIVOS.....	16
3.1 Geral.....	16
3.2 Objetivos Específicos.....	16
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
4.1 Semiárido Brasileiro	16
4.2 Dinâmica da água no solo	18
4.3 Salinidade do solo	22
4.4 Práticas conservacionistas para manejo de solo	23
4.5 Estoques de carbono orgânico no solo.....	25
4.6 Palma forrageira	27
4.7 Geoestatística	30
4.8 Mestrado e Doutorado Acadêmico para Inovação	31
REFERÊNCIAS	32
CAPÍTULO II: CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	40
1 ESQUEMA DE AMOSTRAGEM E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA.....	40
2 RESULTADOS.....	43
3 DELINEAMENTO PARA FUTUROS ESTUDOS.....	44
4 CRONOGRAMA DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS NO PERÍODO DO MESTRADO.....	47
5 CONCLUSÕES	48
REFERÊNCIAS	48
CAPÍTULO III: VARIABILIDADE ESPACIAL HIDRODINÂMICA DO SOLO NO SEMIÁRIDO PELO MÉTODO BEERKAN.....	50
Resumo	50
Abstract.....	51
1 INTRODUÇÃO	52
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	53
2.1 Caracterização e amostragem da área de estudo	53
2.2 Propriedades hidrodinâmicas do solo.....	54
2.3 Análise de dados	56
2.4 Análise Geoestatística	57

3 RESULTADOS.....	58
4 CONCLUSÕES	66
REFERÊNCIAS	66
CAPÍTULO III: VARIABILIDADE ESPACIAL DA SALINIDADE E ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO EM UMA REGIÃO SEMIÁRIDA DO NORDESTE BRASILEIRO SOB CULTIVO DE PALMA FORRAGEIRA.....	70
Resumo	70
Abstract.....	71
1 INTRODUÇÃO	72
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	73
2.1 Área de Estudo	73
2.2 Amostragem de solo	74
2.3 Análises em laboratório	75
2.4 Análise estatística	77
2.6 Análise Geoestatística	78
3 RESULTADOS.....	79
4 CONCLUSÃO	87
REFERÊNCIAS	88
CAPÍTULO IV: ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DA UMIDADE DO SOLO NA PRESENÇA E AUSÊNCIA DE COBERTURA MORTA EM SOLO ALUVIAL.....	92
Resumo	92
Abstract.....	93
1 INTRODUÇÃO	94
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	95
2.1 Área de Estudo	95
2.2 Monitoramento da umidade do solo	95
2.3 Delineamento experimental.....	98
2.4 Calibração do sensor.....	101
2.4.1 Calibração com amostras não deformadas	101
2.4.2 Calibração com amostras deformadas por densidade.	101
2.4.3 Calibração <i>in situ</i>	102
2.4.4 Calibração para diferentes níveis de salinidade	102
2.4.5 Calibração método inverso.....	103
2.5 Análise Estatística	104
2.6 Estabilidade temporal.....	104
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	106
4 CONCLUSÕES	117

REFERÊNCIAS	117
CAPÍTULO V.....	121
CONCLUSÃO GERAL	121

Lista de figuras

Figura 1 - Espaço geográfico do Semiárido Brasileiro.	17
Figura 2 - (a) Composição do solo; (b) movimento da água através do solo por diferença de potencial.	19
Figura 3 - Modelo da curva de retenção de água no solo e seus parâmetros de ponto de murcha permanente, capacidade de campo e água disponível.	21
Figura 4 - Processo resumido do metabolismo MAC.	29
Figura 5 - Localização do Município de Parnamirim -PE, em relação ao Brasil e ao semiárido brasileiro.	40
Figura 6 - Preparo de solo na área experimental da Fazenda Primavera.	41
Figura 7 - Malha dos pontos amostrais para teste de infiltração e amostragem de umidade, densidade, carbono orgânico e condutividade elétrica do solo.	42
Figura 8 - Malha dos pontos amostrais para análise da textura do solo.	42
Figura 9 - Triângulo textural e os pontos amostrados para a caracterização da textura do solo da área experimental.	43
Figura 10 - Croqui da área experimental, irrigada com efluente tratado.	45
Figura 11 - (a) Área determinada por moldura de 1m ² para avaliação da área coberta; (b) análise realizada no software ArcGIS.	46
Figura 12 - Localização da área experimental nas proximidades da BR 316 e margens do Rio Brígida. Vista da Estação de Tratamento de Esgoto operada pela COMPESA, no município de Parnamirim-PE.	47
Figura 13 - Amostragem em campo: (A) Teste de infiltração realizado em campo; (B) Coleta de solo com trado caneca.	55
Figura 14 - Curvas de infiltração acumulada relacionadas com o tempo, I(t), dos 48 pontos amostrais.	58
Figura 15 - Curva de retenção de água no solo dos 48 pontos amostrais.	59
Figura 16 - Curva da condutividade hidráulica estimada para os 48 pontos amostrais.	60
Figura 17 - Gráficos de escala de probabilidade normal da frequência experimental das condutividades hidráulicas saturadas com os dados discrepantes e sem os dados discrepantes.	61
Figura 18 – Semivariogramas e seus respectivos pares das variáveis do Beerkan.	64
Figura 19 - Mapeamento dos parâmetros hidrodinâmicos do solo.	65
Figura 20 - Localização da área experimental Mata Ciliar (MC) e Fazenda Primavera (FP).	74
Figura 21 - Malha da área experimental pertencente a MC e os pontos amostrais.	75
Figura 22 - Determinação da textura pelo método do densímetro de Boyoucus.	75
Figura 23 - Determinação da condutividade elétrica pelo método da pasta saturada do solo.	76
Figura 24 - Determinação do total de carbono orgânico no solo.	77
Figura 25 - Box plot da condutividade elétrica (CE) e estoque de carbono orgânico no solo (ECO) com presença de outliers.	80
Figura 26 - Semivariogramas ajustados para CE.	83
Figura 27 - Semivariogramas ajustados para ECO.	84
Figura 28 - Mapeamento das duas áreas para a CE.	85
Figura 29 - Mapeamento do ECO para a área da Fazenda Primavera e da Mata Ciliar.	86
Figura 30 - Componentes do Sensor Falker HidroFarm.	96
Figura 31 - Esquema do transecto, posicionamento dos sensores e tratamentos com cobertura e sem cobertura.	97

Figura 32 - (a) Manuseio do sensor em campo; (b) Sensor de umidade Falker ^R	98
Figura 33 - Croquis da área experimental destacando a posição do transecto.	99
Figura 34 - Tratamento com cobertura e tratamento sem cobertura.	100
Figura 35 - Pontos amostrais determinados para a coleta de umidade através do anel volumétrico... 100	
Figura 36 - Saturação das colunas de acrílico para a metodologia de Rodrigues (2016).....	104
Figura 37 - (a) Área determinada por moldura de 1m ² para avaliação da área coberta; (b) análise realizada no software QGIS.	107
Figura 38 - Comparação entre as medições dos sensores em diferentes pontos e horários, nos setores com (a) cobertura morta (CC) e (b) sem cobertura (SC). Nomes dos sensores: CC1, CC2, CC3, CC4, CC5, CC6, SC1, SC2, SC3, SC4, SC5 e SC6.	110
Figura 39 - Diferença relativa média e desvio-padrão para a umidade do solo nos setores com (a) e sem cobertura morta (b). Valores em destaque indicam os pontos que mais se aproximaram.	111
Figura 40 - Comparação entre os valores médios da leitura dos sensores no solo e os valores de umidade nas posições com estabilidade temporal, nos setores com (a) e sem cobertura (b).	112
Figura 41 - (a) coleta da amostra não deformada para calibração; (b) tentativa de saturação por capilaridade; (c) camada branca em cima do perfil.....	113
Figura 42 - (a) colunas de acrílico na luz infravermelha; (b) colunas de acrílico para secar ao ar; (c) leitura no sensor mostrando erro de posição do sensor.	113
Figura 43 - Calibração adaptada de Matula et al. (2016). (a) Tubos de PVC para diferentes salinidades; (b) saturação dos solos por capilaridade; (c) amostras submetidas à luz infravermelha; (d) amostras submetidas a luz solar; (e) Leituras sendo realizadas.....	114
Figura 44 - (a) ajuste de curva da calibração in situ com doze pontos; (b) ajuste de curva da calibração in situ para 55 pontos.	115
Figura 45 - ajuste de curva da calibração em laboratório, umidade volumétrica calculada (g.g ⁻¹) x umidade do sensor (%).	115
Figura 46 - Após 24 horas da última aplicação da solução, a coluna de solo foi umidificada com solução CE = 5 dS.m ⁻¹	116

Lista de tabelas

Tabela 1 - Tipos de práticas conservacionistas e suas definições (Adaptada de Lepsch, 2010)	24
Tabela 2 - Caracterização granulométrica e densidade do solo da área experimental.	44
Tabela 3 - Sorteio dos cultivos dos tratamentos.....	46
Tabela 4 - Cronograma das atividades realizadas em campo.....	48
Tabela 5 - Estatística descritiva dos parâmetros.	62
Tabela 6 - Parâmetros dos semivariogramas.	63
Tabela 7 - Classificação da salinidade do solo de acordo Sistema. Brasileiro de Classificação de Solos (2018).	76
Tabela 8 – Média, desvio padrão e classificação textural das áreas da Fazenda Primavera e Mata Ciliar.....	79
Tabela 9 - Estatística descritiva dos dados amostrados para condutividade elétrica (CE).....	80
Tabela 10 - Estatística descritiva dos dados amostrados para estoque de carbono orgânico no solo (ECO).	81
Tabela 11 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados para CE e sua validação.....	83
Tabela 12 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados para ECO.	84
Tabela 13 - Sorteio dos cultivos dos tratamentos.....	99
Tabela 14 - Estatística descritiva dos parâmetros físicos e hidráulicos do solo da área experimental na camada superficial.....	107
Tabela 15 - Estatística descritiva temporal dos dados da leitura do sensor (%) coletados com FALKER HidroFarm, com e sem cobertura morta.....	108
Tabela 16 - Estatística descritivas diferentes tratamentos e profundidades	116

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

O semiárido brasileiro compreende 1.135 municípios e é caracterizado por uma evapotranspiração anual média superior a 1.800 mm, que pode alcançar os 3.000 mm, e precipitações irregulares variando entre 280 mm e 800 mm anuais, que culminam em elevado *déficit* hídrico (ARAUJO, et al, 2019). Segundo Bezerra et al. (2019), devido à alta variabilidade das precipitações, a disponibilidade de água é fator limitante no semiárido nordestino.

Segundo Santos (2011), dentre as condições que influenciam diretamente na disponibilidade hídrica, estão o clima, vegetação, topografia e textura do solo. A infiltração de água no solo aumenta a disponibilidade hídrica em períodos de seca ao reabastecer aquíferos subterrâneos, e controla o balanço hídrico na zona radicular das plantas (BRANDÃO et al., 2006). Testes podem ser feitos em laboratório ou em campo para caracterizar esse processo.

Outra problemática recorrente no semiárido devido à baixa precipitação e a alta taxa de evapotranspiração é a salinização do solo e a perda de carbono orgânico, o que resultando em uma menor produtividade. (SHANKAR & EVELIN, 2019; CASTRO & SANTOS, 2020; TONDOH et al., 2016). O conhecimento da distribuição espacial dos elementos que regem esses processos permite ao produtor aprimorar o manejo do solo por meio da definição de zonas de manejo ao buscar estratégias de sustentabilidade agrícola em áreas com riscos potenciais de salinização e perda de carbono orgânico (RODRIGUES et al., 2018; MINHAS et al., 2020; VERONESI & SCHILLACI, 2019).

Como aliada, a geoestatística tem sido utilizada em pesquisas para criar mapas de variabilidade espacial, funcionando como uma ferramenta para uma estimativa mais completa das variáveis, resultando em melhor uniformidade de análise de dados (NIÑEROLA et al., 2017; DINH et al., 2018; MARINHO JUNIOR et al., 2020).

Contudo, Bertoni & Neto (2014) destacam que parte dessas condições podem ser manejadas por meio do emprego de práticas conservacionistas de água e solo. Os autores ressaltam que a cobertura morta como uma das práticas de caráter vegetativo, consiste em formar uma camada de proteção sobre o solo, protegendo-o de processos erosivos. A citada prática é recomendada especialmente para regiões de altas temperaturas e baixa precipitação.

2 HIPÓTESES

- Métodos simplificados infiltração do solo possibilitam adequada avaliação de suas propriedades hidráulicas e sua variabilidade espacial, através do mapeamento dos parâmetros da curva de retenção de água no solo.
- A variabilidade espacial da condutividade elétrica e do estoque de carbono orgânico em áreas aluviais auxiliam em futuros manejos conservacionistas com precisão.

3 OBJETIVOS

3.1 Geral

Analisar as propriedades físicas, químicas e hidráulicas de área aluvial irrigada com efluente doméstico tratado, bem com a variabilidade espacial de variáveis associadas, investigando desempenho de técnicas conservacionistas na manutenção da umidade do solo.

3.2 Objetivos Específicos

- Analisar a infiltrabilidade do solo aluvial irrigado;
- Avaliar os padrões espaciais de infiltração, de sais e de carbono no solo;
- Investigar a dependência espacial do carbono orgânico no solo, analisando-o como possível indicador de fertilidade do solo;
- Avaliar a estabilidade temporal da umidade do solo, na presença e na ausência de cobertura morta.
- Calibração de sensor de umidade.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Semiárido Brasileiro

O Semiárido Brasileiro (SAB) está inserido nos Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Alagoas, Sergipe, Bahia e parte de Minas Gerais (Figura 1) (SUDENE, 2017). A região ocupa uma área de cerca de 969.589 km², com 1.135 municípios. De acordo com o Censo Demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2019), a estimativa da população do SAB é de 27.722.782 habitantes.

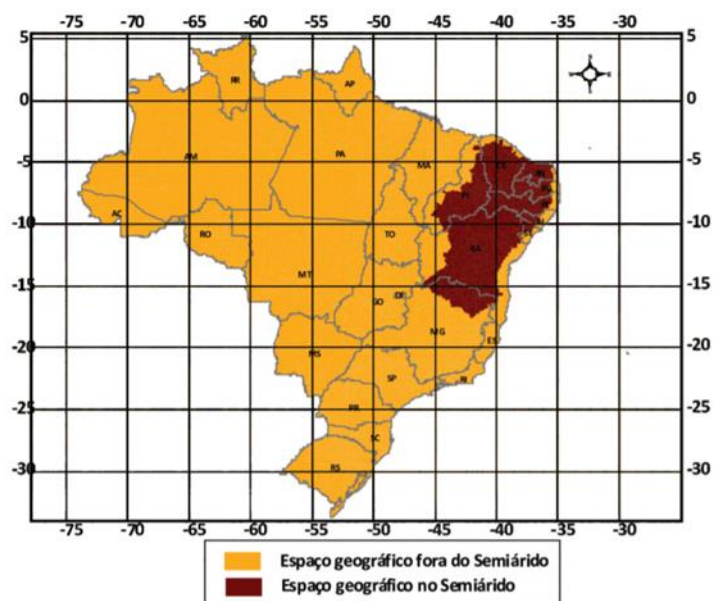


Figura 1 - Espaço geográfico do Semiárido Brasileiro.

A região apresenta características específicas climáticas que Araújo (2011) resumiu como sendo: temperaturas altas, precipitações escassas, compreendidas entre 280 mm e 800 mm, e concentradas em período de curto tempo, e déficit hídrico. A respeito do *déficit* hídrico, isto ocorre porque o potencial de evapotranspiração ultrapassa as precipitações, com média de 1800 mm, podendo chegar a 3000 mm (ARAÚJO et al., 2019).

podendo ser hipoxerófica ou hiperxerófica, a depender da maior ou menor disponibilidade hídrica (EMBRAPA, 2011).

A região semiárida caracteriza-se por apresentar relevo plano a ondulado, com vales muito abertos, pela menor resistência à erosão dos xistos e outras rochas de baixo grau de metamorfismo (TROLEIS & SANTOS, 2011). A geologia da região de clima semiárido nordestino, em especial, é modelada por dois tipos de estruturas: O embasamento cristalino (ocupando 70% dessa região), geralmente apresentando solos rasos e eutróficos (saturação por bases igual ou superior a 50%); e as bacias sedimentares, geralmente com solos profundos, maiores que 2 m, com alta capacidade de infiltração, baixo escoamento superficial e boa drenagem natural (GAMA & JESUS, 2020).

Como a maioria dos solos desta área são solos jovens no sentido pedogenético, ou seja, são solos pouco intemperizados, com pouca profundidade efetiva e baixa capacidade de retenção de água no perfil, o que influencia na composição da flora na região e dificulta a agricultura de subsistência, eles são caracterizados por não possuírem uma boa aptidão agrícola (OLIVEIRA et al. 2018). Além disso, o resultado combinado das condições climáticas e relevo condiciona a hidrografia a ser frágil, sendo usualmente insuficiente para sustentar rios perenes, com exceção do rio São Francisco (TROLEIS & SANTOS, 2011). Com isso a aplicação de métodos de gestão adequados, é fundamental para aumentar os rendimentos e a eficiência dos sistemas de produção nessa região (ALVES et al., 2022).

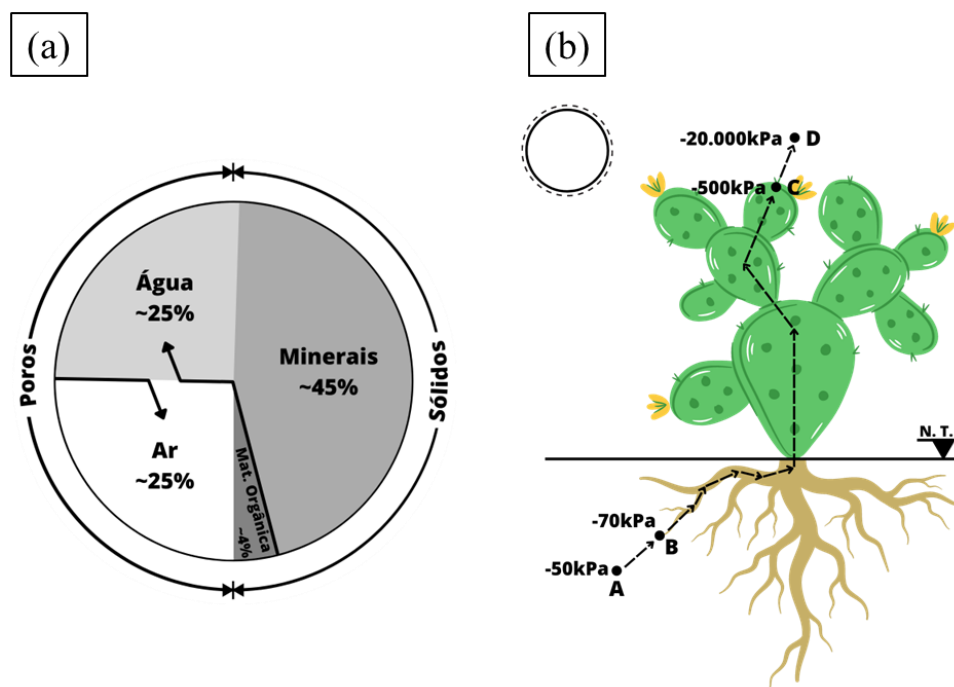
Essa região contém muitos estabelecimentos rurais pequenos que são geridos de forma ineficiente, resultando em esgotamento de recursos e posterior abandono das áreas, resultando na abertura de novas fronteiras e início de processos de degradação, perda de biodiversidade em áreas abandonadas, e o início da desertificação (VIEIRA et al., 2015). De acordo com Alves et al. (2022), esse cenário, evidencia a falta de avanços tecnológicos e de transferência de conhecimentos benéficos dos sistemas de produção na região, sendo de particular relevância o emprego de práticas agrícolas que melhorem os sistemas de produção e promovam maiores retornos socioeconômicos.

4.2 Dinâmica da água no solo

O solo constitui a parte agricultável da crosta terrestre, sendo composto por três partes, a sólida, líquida e a gasosa (LEPSCH, 2011). A parte sólida é referente à matéria orgânica e

mineral, já líquida são soluções de sais, compostos orgânicos com teores de água, e por fim a gasosa é composta de ar (Figura 2a) (REICHARDT, 2016).

O movimento da água através do solo ocorre principalmente, em sua fase líquida, em reposta a diferença de potencial hidráulico (REICHARDT, 2016). Esse movimento é decrescente, isto é, se inicia do ponto que possui maior potencial para o ponto de menor potencial (Figura 2b).



Fonte: Adaptado de Lepsch, 2011

Figura 2 - (a) Composição do solo; (b) movimento da água através do solo por diferença de potencial.

A equação que melhor descreve a movimentação da água foi formulada por Darcy e depois adaptada por Buckingham (Equação 1).

$$q = -K \cdot \text{grad } H \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

q = densidade do fluxo (mm.dia⁻¹)

$\text{grad } H$ = gradiente potencial hidráulico (m.m⁻¹)

K = condutividade hidráulica do solo, que depende do seu potencial mátrico

A estimativa do balanço hídrico é importante em termos agrícolas, pois consiste na definição das condições hídricas presentes no solo no qual a planta se desenvolve, nos seus diferentes estádios fenológicos, incluindo os processos de infiltração, redistribuição, evaporação e absorção da água pelas plantas (REICHARDT, 2016).

A porosidade do solo é a fração do solo que não é ocupada pela parte sólida (LEPSCH, 2011). Quando o solo se encontra saturado, a área útil para o fluxo de água é proporcional a sua porosidade, contudo em condições de solo não saturado, sua área útil está relacionada à sua umidade (REICHARDT, 2016).

Duas variáveis importantes para se entender a relação de solo-água-planta são a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). Conforme Lepsch (2011), a capacidade de campo (CC) é quantidade máxima de água distribuída nos poros do solo, após cessada a drenagem por gravidade, e desse modo é a capacidade máxima do solo de armazenar água, ocorrendo uma condição de equilíbrio entre o potencial gravitacional e matricial. Já o ponto de murcha permanente (PMP) é um valor crítico, que ocorre quando a planta não mais consegue absorver água, atingindo o seu murchamento irrecuperável. Ao definir CC e PMP, a faixa de variação entre eles equivale à água disponível (AD) (Equação 2) para a planta:

$$LAD = (CC - PMP) \times Z \quad \text{(Equação 2)}$$

em que:

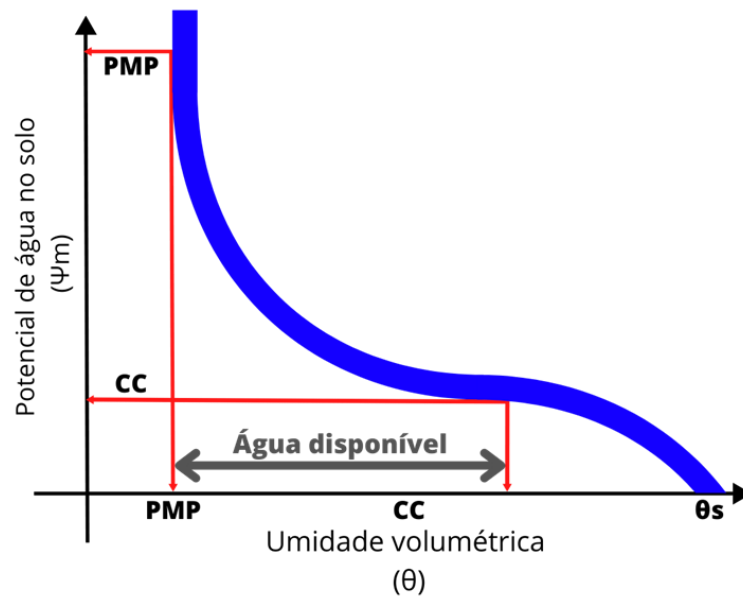
LAD = Lâmina total de água disponível (mm)

CC = capacidade de campo (% de volume)

PMP = ponto de murcha permanente (% de volume)

Z = profundidade efetiva do sistema radicular (mm).

Os valores de CC e o PMP são referenciais na curva de retenção no solo (Figura 3). A determinação dessa curva é muito importante para o manejo da irrigação, possibilitando o conhecimento da energia da água retida no solo, dando suporte à tomada de decisão de quando e quanto irrigar, e auxiliando na estimativa da distribuição e do tamanho dos poros (FILGUEIRAS, 2016; REINERT & REICHERT, 2006).



Fonte: Autor, 2022.

Figura 3 - Modelo da curva de retenção de água no solo e seus parâmetros de ponto de murcha permanente, capacidade de campo e água disponível.

Dentre os modelos matemáticos para representar a curva de retenção, destaca-se o de van Genuchten (1980) (Equação 3), aplicável a diversos solos (FILGUEIRAS, 2016; MEZZOMO, 2018). O modelo estabelece uma relação entre o potencial matricial (relacionado às forças capilares e as de adsorção) e a umidade do solo:

$$(\theta) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[(1 + (\alpha \Psi_m)^n)^m]} \quad \text{(Equação 3)}$$

$$m = 1 - 1/n \quad \text{(Equação 3a)}$$

Em que:

θ = umidade volumétrica ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)

Ψ_m = potencial matricial (kPa)

θ_r = umidade residual do solo

θ_s = umidade de saturação

n , m e α = parâmetros de ajuste do modelo.

4.3 Salinidade do solo

No semiárido do Nordeste brasileiro, a escassez e a irregularidade de chuvas provocam o desabastecimento dos reservatórios, resultando em falta de água e assim dificultando as práticas agrícolas. Dessa forma, especialmente na região do Sub-Médio São Francisco, a prática da agricultura é caracterizada pelo intensivo uso do solo com cultivos irrigados (SIMÕES et al., 2021).

Na região semiárida, principalmente em perímetros irrigados, quando os solos são caracterizados pela alta concentração de sais solúveis e a prática da irrigação quando realizada incorretamente, pode resultar em salinidade do solo, restringindo severamente a atividade fisiológica e a capacidade produtiva das culturas (SALVATI & FERRARA, 2015; KIM et al., 2016; SANTOS et al., 2019; YUSUF et al., 2020).

A salinização do solo é um problema global, que ameaça a produtividade e a sustentabilidade agrícola e que constitui uma das causas mais relevantes da degradação ambiental (XU et al., 2019; SAFDAR et al., 2019; JUSTO et al., 2021). O problema é ainda mais evidente em regiões áridas e semiáridas devido à baixa precipitação e a alta taxa de evapotranspiração (SHANKAR & EVELIN, 2019; CASTRO & SANTOS, 2020).

Os impactos da salinização dos solos afetam a dinâmica de organização espacial das populações, promovendo redução das produções agrícola, colocando em evidência a segurança alimentar e a economia das comunidades (CASTRO & SANTOS, 2020). Mustafa & Akhtar (2019) relatam que cerca de 50% da terra será salinizada nos próximos 50 anos se não forem técnicas para reduzir e mitigar o impacto adverso da salinidade do solo.

Com excesso de sais, o potencial osmótico do solo é aumentado e as plantas têm dificuldade para assimilar a água, portanto, é comprometida a infiltração da água no perfil do solo (LEPSCH, 2010). Dentre as causas do processo de salinização, deve-se mencionar o uso de águas ricas em sais para a irrigação de cultivos. Especificamente para o reuso de efluentes tratados para irrigação, os teores de sais presentes em tais águas pode ocasionar o acúmulo de sais no perfil de solo. O agravamento dessa condição torna o solo susceptível à desertificação, em função da pouca água armazenada pela vegetação e pelo próprio solo, podendo ocorrer encrostamento na superfície, que reduz a sua infiltrabilidade.

Para buscar estratégias para a sustentabilidade agrícola de áreas com potenciais riscos de salinização, o conhecimento da distribuição espacial dos elementos que governam esses processos permite ao produtor melhorar o manejo do solo através da definição de zonas de

manejo (RODRIGUES et al., 2018; MINHAS et al., 2020). Nesse sentido, pesquisas têm utilizado a geoestatística como uma ferramenta eficiente para construção de mapas de variabilidade espacial (NIÑEROLA et al., 2017; DINH et al., 2018).

4.4 Práticas conservacionistas para manejo de solo

O manejo sustentável do solo, além de proporcionar suporte ao desenvolvimento adequado da fauna e flora, está intimamente ligado à conservação ambiental e à eco hidrologia, além de contribuir para o desenvolvimento agrícola, social e econômico (LEPSCH, 2010, FAO, 2015). Quando o manejo conservacionista do solo não é empregado, principalmente em práticas agrícolas, as consequências são a aceleração da erosão do solo e a sua degradação (LEPSCH, 2010). O solo exposto é susceptível aos processos de desagregação de partículas, erosão, lixiviação, acidificação, e desertificação, (LEPSCH, 2010). Como consequência destes processos, podem ser gerados danos irreversíveis à fertilidade do solo, dificuldades no manejo, formação de grandes sulcos e voçorocas, além do carreamento de partículas para corpos hídricos (BERTONI, 2014). A erosão hídrica ocorre a partir da desagregação, transporte das partículas e deposição, sendo acentuada pelo impacto direto das gotas da chuva na superfície de um solo sem proteção, assim como pelo escoamento superficial.

Borges et al. (2014) constataram que os tratamentos conservacionistas além de aumentar o armazenamento de água no solo, proporcionando a umidade por mais tempo, também promoveu um aumento na produtividade no plantio de milho em sequeiro no semiárido, o que também foi comprovado por Santos et al. (2010), com a cultura do feijoeiro em sequeiro, onde a cobertura morta promoveu o incremento da produtividade no período de seca e maior retenção de água no solo.

Um estudo desenvolvido por Lima et al. (2016) constatou que a maioria dos agricultores na região do semiárido pernambucano não possui conhecimentos sobre práticas conservacionistas do solo e a sua importância de serem realizadas, atribuindo apenas à falta de água a baixa aptidão das áreas agrícolas da região. Práticas simples como a adoção de cobertura morta sobre o solo raramente são utilizadas.

Com objetivo de reduzir significativamente a erosão, as práticas conservacionistas protegem o solo, possibilitando o aumento da capacidade de infiltração de água e armazenamento de nutrientes para o desenvolvimento das plantas (LEPSCH, 2010). Lepsch

(2010) classifica essas técnicas em três tipos: de caráter edáfico, mecânico e vegetativo (Tabela 1).

Tabela 1 - Tipos de práticas conservacionistas e suas definições (Adaptada de Lepsch, 2010)

Tipos de práticas conservacionistas	Definição
Edáfico	Baseia-se em: eliminação ou controle das queimadas, adubação e rotação de culturas.
Mecânico	Utilização de máquinas para fazer alguma alteração no relevo, corrigir declives, construções de canais, linhas de níveis, dentre outros.
Vegetativo	Aumento da cobertura vegetal no solo, a partir de reflorestamento, formação e manejo adequado de pastagens, controle das capinas, quebra vento e cobertura do solo com palha (“mulch”) ou acolchoamento.

O uso de cobertura morta na superfície do solo é uma técnica que o protege contra o acúmulo de sais, e contra a erosão e pode ser utilizada para reduzir a evaporação, com isso aumenta-se a disponibilidade de água para a planta por mais tempo, e reduz-se a concentração de sais na superfície (ZRIBI et al., 2015).

Nesse sentido, a aplicação de técnicas conservacionistas, como no caso da cobertura morta, é capaz de reduzir a evaporação do solo, preservando por mais tempo a umidade nele presente (LI, 2013). Nas condições do semiárido, esse tipo de prática conservacionista se mostrou adequada para a manutenção da umidade (SANTOS et al., 2011). Além disso, a redução do transporte de sedimentos e aumento da infiltração da água conferem à técnica uma boa indicação para conservação da água e do solo, preservando suas propriedades hidráulicas, conforme estudo de Montenegro et al. (2013), adotando chuva simulada e de alta intensidade, com palhada de diferentes densidades.

Diversos estudos em parcelas experimentais no Agreste de Pernambuco demonstraram o potencial da cobertura morta e de cordões vegetativos de palma forrageira para manutenção de umidade do solo. Santos et al. (2010) avaliaram tal desempenho medindo-se a umidade do solo com Sonda de Nêutrons, enquanto Santos et al. (2011) investigaram a dinâmica temporal da umidade do solo com sondas CS 616 da Campbell Scientific, em cultivos com uso de

práticas conservacionistas. Já Borges et al. (2014) constataram a importância da cobertura morta em plantio de sequeiro de milho.

O uso de cobertura do solo com oleaginosas resulta em menores valores de escoamento e perdas de solos, comparando-se ao solo descoberto (LIMA et al., 2020). A cobertura serve para a dissipação de energia cinética da chuva, sendo a intensidade da chuva o fator mais importante na geração de escoamento e perdas de solo. A cobertura também auxilia na retenção de água no solo e na absorção da água da chuva (LIMA et al., 2020; LOPES et al., 2019).

Silva, et al. (2019b) para avaliar os efeitos erosivos da cobertura morta no solo, empregaram o capim brachiaria (*Brachiaria decumbens*) na densidade de 3 Mg. ha⁻¹. Já para analisar os efeitos de cobertura vegetal na umidade do solo, Lopes et al. (2019) também com a brachiaria como cobertura utilizaram a densidade de 8 Mg.ha⁻¹. Santos et al. (2011), fez uso de capim elefante (*Pennisetum purpureum Schum*) com densidade de 6,18 Mg ha⁻¹. O pó de coco foi utilizado por Montenegro et al. (2020), com densidade de 8 Mg.ha⁻¹, para investigar o impacto de técnicas conservacionistas na redução das perdas de sedimentos e no incremento da umidade do solo. Tais estudos foram conduzidos por meio de experimentos na região do semiárido brasileiro, assim como se propõe o presente projeto de dissertação.

Contudo, Montenegro et al. (2020), por meio de experimento utilizando parcelas sob chuva natural, no semiárido brasileiro, concluíram que há aumento significativo na retenção da umidade do solo em parcelas com cobertura morta do que em solo nu. Zribi et al. (2015) também recomendam o uso de cobertura morta, orgânica e inorgânica, para o controle de evaporação da água no solo, no caso de sistemas de irrigação de alta frequência. No estudo foi verificado que todos os materiais de cobertura utilizados diminuíram a taxa de evaporação em comparação com a condição de solo descoberto.

Atrelado ao uso de cobertura morta, há a aplicação de irrigação por gotejamento em áreas de escassez hídrica (WANG et al., 2014; ZHANG et al., 2020). Nesse contexto, o método de gotejamento promove uma distribuição com elevado grau de uniformidade de água no solo, que atrelada à cobertura morta é capaz de reduzir a evaporação do solo, mantendo a infiltrabilidade e a umidade, e evitando a concentração de sais (ZHANG et al., 2020).

4.5 Estoques de carbono orgânico no solo

Os níveis de carbono orgânico nos solos são regulados pela incorporação de resíduos vegetais à produção e pela atividade de organismos decompositores, e ambos os fatores variam de acordo com as condições climáticas e tipos de solos (VICENTE et al., 2019). No caso das regiões áridas e semiáridas, por exemplo, o estoque de carbono nos solos é bem menor quando comparado às regiões tropicais e temperadas (MEDEIROS, 2019).

Os solos do semiárido nordestino possuem uma reserva de aproximadamente 8,8 Pg de carbono, dos quais 4,0 Pg estão presentes no bioma Caatinga (SAMPAIO; COSTA, 2011). Sá et al. (2018), destacam o papel da vegetação na recuperação do solo por meio do cálculo de um índice que avalia o estoque de carbono orgânico do solo, ressaltando que esse componente é um forte preditor da qualidade do solo e que a amostragem deve ser feita em camadas profundas.

Portanto, práticas de manejo conservacionista são utilizadas com o objetivo de reduzir as perdas desse estoque de carbono desses solos para a atmosfera, visto que contribuem para manter a agregação do solo e aumentar o teor de matéria orgânica (FUJISAKI, et al. 2018). Essa redução pode ser potencializada com o uso de espécies forrageiras adaptadas aos ecossistemas áridos e semiáridos, que geralmente acumulam mais carbono em comparação com as culturas agrícolas, devido à alta densidade de seu sistema radicular fascicular e sua capacidade de utilizar pequenas quantidades de água disponíveis no solo (FERRAZ et al., 2017, MONROE et al., 2021).

Boubhziz et al. (2020) relacionaram o manejo do solo ao estoque de carbono em uma região semiárida, constatando que o estoque foi maior em áreas com florestas degradadas, pois essa condição conferiu maiores quantidades de carbono orgânico ao solo, do que em regiões com atividades agrícolas intensivas.

Estudos sobre a eficácia do sequestro de carbono orgânico nos solos como ferramenta de mitigação das mudanças climáticas estão ganhando força (GONÇALVES et al., 2019; FERREIRA et al., 2018; JESUS et al., 2019; ZHOU et al. 2019; TONDOH et al., 2016). Concomitantemente, Programas do Governo Federal ligados ao estudo de estoques de carbono, manejos conservacionistas de água e solo vem sendo destaque no Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento.

Com objetivo central de proporcionar, no meio agropecuário, a adoção das boas práticas no manejo de água e solo, o Programa "Águas do Agro" surge alicerçado em desordens climáticas, com as quais o setor agropecuário será intensamente afetado (MAPA, 2021). Ainda segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA

(2021), a conservação dos solos é indispensável para a produção, visto que é uma importante fonte de recursos como nutrientes e água, além de ser considerando um "grande sumidouro de carbono". O Programa visa ainda, dentre os seus objetivos específicos, incentivar adoção de tecnologias de conservação de água e solo, que evitam erosão, bem como o incentivo à adoção de práticas conservacionistas e com isso, alcançar os resultados esperados com a adoção do programa, como a melhoria da qualidade de solos e águas, seu uso sustentável e ampliação de fixação de carbono no solo.

O Projeto "PronaSolos - Programa Nacional de Solos do Brasil" instituído pelo Decreto nº 9.414, de 19 de junho de 2018 surgiu da carência de informações acerca dos solos que compõem o território brasileiro, que possui menos de 5% de mapas de solos com escala superior a 1:100.000 (Embrapa). Com objetivo de mapear 8,2 milhões de quilômetros quadrados de solos brasileiros até o ano de 2048, o Projeto busca impactar diretamente no melhor planejamento do uso da terra para os meios urbano e rural, melhorando seu uso e consequentemente sua forma de manejo (Embrapa), orientando "os planos e os programas governamentais de recuperação, de conservação, de uso e de manejo sustentável do solo e dos recursos naturais correlatos" (BRASIL, 2018).

O Plano de Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária (ABC+) baseia-se no enfrentamento às mudanças climáticas e sustentabilidade no setor agropecuário a partir de estratégias que visam um uso mais holístico das áreas com potencial de exploração conjuntamente com iniciativas de valorização dos recursos e consequente conservação (MAPA, 2021). Outro viés do projeto ABC+ busca ampliar a utilização de sistemas conservacionistas, de baixa mobilização de solo, de rotação de culturas, de integração, de maior diversidade biológica, visando adaptação a condições climáticas adversas e mitigação, como por exemplo, os solos equilibrados como sumidouros de Gases de Efeito Estufa (GEEs) (MAPA, 2021).

4.6 Palma forrageira

Os fatores edafoclimáticos são os principais limitantes da produção pecuária no Semiárido brasileiro, dentre eles, a precipitação pluviométrica se destaca por apresentar uma alta variabilidade espaço-temporal, com precipitação média igual ou inferior a 800 mm⁻¹ ao ano (CAMPOS et al., 2017). Desta forma, durante o período de escassez hídrica ocorre um déficit na disponibilidade de forragem, o qual compromete a produção animal (ALVES et al.,

2020). Assim, a palma forrageira (*Opuntia* spp. e *Nopalea* spp.) mostra-se como alternativa para mitigar essa limitação, posto que suas particularidades morfofisiológicas são eminentemente adaptadas às condições edafoclimáticas da região semiárida (ALVES et al., 2020; AMORIM et al., 2017; LIMA et al., 2021).

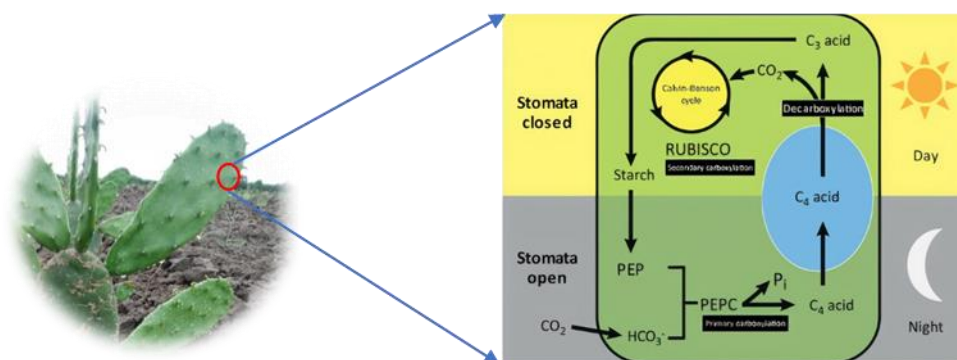
Vale destacar a utilização de águas de qualidade inferior, como o esgoto bruto e tratado, é uma prática adotada por pequenos produtores durante a irrigação, conforme destaca König (1997). Esta prática pode colocar em risco quem consome tais produtos, visto que o consumo de produtos contaminados poderá servir como meio de transmissão de doenças (MAROUELLI, 2008). Por outro lado, conforme destaca Corrêa (2021), o correto manejo destas águas pode impactar no teor de matéria orgânica no solo e, a prática de irrigação da palma forrageira com águas residuárias é capaz de proporcionar segurança alimentar na pecuária do semiárido.

Oriunda do México e pertencente à família das cactáceas, a palma forrageira possui em torno de 130 gêneros, dentre eles 1.500 espécies conhecidas (LOPES et al., 2019; PESSOA et al., 2020). Cultivada principalmente no continente americano, estende-se pela Europa, África, Ásia e Oceania (SALVADOR et al., 2021). Atualmente, o Brasil tem a maior área cultivada de cactos para forragem no mundo, cerca de 600.000 ha são plantados com esta cultura, onde 500.000 ha estão localizados na região Nordeste, sendo predominantemente os gêneros *Opuntia* (e. g., variedades redonda e gigante) e *Nopalea* (e. g., variedades miúda e doce) (DUBEUX et al., 2010; LOPES et al., 2019). Sua produtividade varia entre 20 e 40 toneladas por hectare, sendo Bahia, Paraíba, Pernambuco, Sergipe, Alagoas, Rio Grande do Norte e Ceará os estados mais produtivos em ordem decrescente. Contudo, a produção vai variar de acordo com a variedade cultivada e os manejos adotados (NASCIMENTO et al., 2020).

A palma forrageira apresenta características morfoanatômicas as quais favorecem sua adaptação ao ambiente semiárido, tais como a presença de tricomas e estômatos profundos (NASCIMENTO et al., 2020), seu mecanismo fisiológico se distingue das demais plantas forrageiras por apresentar metabolismo ácido das crassuláceas (CAM) (NUNES et al., 2020). Essas características proporcionam na palma forrageira a habilidade de adaptação a longos períodos de seca, tolerância a altas temperaturas, capacidade em armazenar rapidamente água em seus tecidos e uma eficiência no uso da água de 3 a 10 vezes maior do que as plantas C3 e C4 (YANG et al., 2015). Por possuir o mecanismo CAM, seus estômatos abrem durante a

noite e permanecem fechados durante o dia, desta forma a perda de água para a atmosfera é reduzida.

No período noturno, a palma forrageira realiza a abertura estomática, captando CO₂ atmosférico e por meio da ação da enzima fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPCase) no citosol das células, resultará na formação do oxaloacetato, o qual posteriormente é reduzido e armazenado no vacúolo como ácido málico. No início do dia, os estômatos permanecem fechados, o malato armazenado é transportado para os cloroplastos e por meio da enzima NADP-málica é descarboxilado liberando CO₂, esse será fixado novamente pela Rubisco no ciclo de Calvin Benson resultando na produção de carboidratos, maximizando a eficiência no uso da água pela planta no período diurno (Figura 4) (BORLAND et al., 2014; SILVA et al., 2021; SOUZA et al., 2019).



Fonte: Adaptado de Borland et al. (2014).

Figura 4 - Processo resumido do metabolismo MAC.

Mesmo com essas particularidades, a palma forrageira expressará seu potencial produtivo de forma eficiente especialmente em ambientes com precipitações pluviométricas entre 368 mm e 812 mm, seu cultivo em regiões com precipitações abaixo do indicado, deve-se fazer o uso de irrigação complementar (SALVADOR et al., 2021).

A palma forrageira é de elevada importância na alimentação de ruminantes, pois além de possuir grande quantidade de carboidratos não fibrosos, o que lhe confere altos teores de energia, é fonte de vitaminas, minerais e diminui o consumo de água pelos animais, dado que seus cladódios são constituídos por cerca de 90% de água (ALVES et al., 2021; SALVADOR et al., 2021). No entanto, os níveis de proteína bruta e fibra são baixos, desta forma a palma forrageira deve ser ofertada conjuntamente com alimentos que apresentem alta quantidade de fibras para evitar distúrbios nutricionais nos ruminantes (SOUZA et al., 2019).

Silva et al. (2020) utilizaram a técnica da geoestatística para estudar a variabilidade espacial de atributos físicos do solo e produção de palma forrageira no semiárido pernambucano. O emprego dessa ferramenta se mostrou necessária para relacionar o manejo da cultura da palma com variáveis edáficas, fornecendo as bases para adoção de agricultura de precisão, e para demonstrar o elevado potencial da palma para a região.

4.7 Geoestatística

Quando amostragens ou medições são realizadas sistematicamente no espaço ou no tempo, espera-se que apresentem uma autocorrelação, desde que a distância ou o intervalo de tempo sejam suficientemente reduzidos para capturar a dependência existente entre elas (VIEIRA; XAVIER; GREGO, 2008). Quando se analisa a variabilidade espacial, quanto menor a distância euclidiana entre as amostras, maior a chance de ocorrer semelhança (VIEIRA, 2000).

A geoestatística é aplicada com objetivo de caracterizar uma variável regionalizada de interesse a partir de amostragem, devidamente georreferenciada, observando sua distribuição e variabilidade espaciais, e correlacionando também as incertezas nas estimativas (YAMAMOTO & LANDIM, 2015). Vieira (2000) define uma variável regionalizada como uma função espacial numérica, que varia de um ponto para o outro com uma continuidade, porém não pode ser descrita por meio de uma função matemática simples. A ferramenta utilizada para estimar essa continuidade ou dependência espacial é o semivariograma.

O semivariograma está relacionado com a dependência entre as amostras em função da distância de separação, apresentando um crescimento até estabilização em uma determinada distância ou alcance (VIEIRA; XAVIER; GREGO, 2008). Antes de iniciar a análise de geoestatística é fundamental realizar uma análise estatística descritiva clássica. E posteriormente à obtenção do semivariograma, faz-se necessária à sua validação (MONTENEGRO & MONTENEGRO, 2006).

Silva et al. (2017) modelaram as variáveis do balanço hídrico utilizando ferramentas geoestatística, para analisar a distribuição espacial da evapotranspiração, chuva e índice de aridez anual no semiárido brasileiro. Os autores concluíram que a evapotranspiração do semiárido brasileiro demanda mais de 95% da água precipitada, e que isso compromete a disponibilidade hídrica.

Carvalho et al. (2019) investigaram a dependência espacial da umidade do solo e de atributos edáficos em plantio de milho em regime de sequeiro, na ausência e na presença de cobertura morta, no Agreste de Pernambuco. Constatou-se a relevância da cobertura morta para redução do grau de variabilidade da umidade. Mapas das variáveis de interesse foram produzidos, de modo a orientar o manejo agrícola da área, fornecendo assim bases para a adoção de agricultura de precisão. Com efeito, a krigagem é um método de interpolação que utiliza as informações geradas pelo semivariogramas. Esse método consiste em utilizar os parâmetros dos semivariogramas para realizar uma estimativa nos pontos não amostrados ao longo da malha experimental.

Ao analisar a variabilidade espacial da resistência à penetração e teor de água em um Neossolo, Batista et al. (2019) utilizaram os mapas de krigagem para mapear a resistência à penetração, e concluíram que ocorreu uma redução na resistência mecânica nos pontos que apresentaram aumento no teor de água no solo.

4.8 Mestrado e Doutorado Acadêmico para Inovação

No ano de 2013 o CNPq iniciou um projeto piloto denominado “Doutorado-Acadêmico Industrial”, que visava aproximar indústria e doutorandos, proporcionando o desenvolvimento de pesquisas mais aplicadas às necessidades da indústria. Posteriormente, o projeto foi ampliado para abarcar os programas de mestrado por meio da Resolução CNPq Nº7/2020, tornando-se então o Programa de Mestrado e Doutorado Acadêmico para inovação – MAI/DAI (BRASIL).

O MAI/DAI está em acordo com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO): água potável e saneamento (ODS 6) e parcerias e meios de implementação (ODS 17), alcançando também áreas prioritárias para o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), que são relacionadas às tecnologias associadas com a qualidade de vida, produção e desenvolvimento sustentável.

Projeto foi aprovado em 2020 no âmbito do MAI/DAI CNPq, envolvendo parceria entre a Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), a Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), Instituto Nacional do Semiárido (INSA) e a TPF Engenharia (empresa privada) para reúso de água para a produção agrícola. Visando os benefícios do ponto de vista da sustentabilidade (social, econômico e ambiental) advindos do correto

tratamento e destinação das águas residuárias domésticas para o semiárido, o projeto estimula a pesquisa e inovação na área de efluentes como uso agrícola, agregando as graduações e pós-graduações das ciências agrárias. Esta Dissertação está inserida no âmbito deste projeto, desenvolvida em unidade de reúso experimental situada no município de Parnamirim-PE.

O Instituto Nacional do Semiárido (INSA) têm trabalhado com as possibilidades de reúso de águas residuárias no setor agrícola do Semiárido brasileiro com objetivo de colaborar com a segurança alimentar humana e animal, assim como dar melhor destinação a esgotos tratados e impactar na produção na região, altamente dependente das cactáceas (INSA, 2020). O projeto de REÚSO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS DO SETOR AGRÍCOLA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO objetiva avaliar o consórcio entre palma forrageira e outras espécies forrageiras e frutíferas utilizando irrigação por gotejamento de esgotos tratados, analisando possíveis impactos da utilização deste efluente sobre o solo, plantas e frutos (INSA, 2020). Espera-se com o projeto, impactar positivamente na fertilidade dos solos, melhor destinação das águas residuárias com consequente redução de poluição de corpos hídricos e incentivar práticas de reúso de efluentes tratados na irrigação (INSA, 2020).

REFERÊNCIAS

ALVES, C. P. et al. Consórcio palma-sorgo sob lâminas de irrigação: balanço de água no solo e coeficientes da cultura. **Agrometeoros**, v. 27, n. 2, p. 347–356, 2020.

ALVES, C. P. et al. Resiliência agrícola no cultivo consorciado palma-sorgo em ambiente semiárido: uma revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 07, p. 3932–3952, 2021.

ALVES, H. K. M. N.; JARDIM, A. M. R. F.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SOUZA, C. A. A.; LEITE, R. M. C.; SILVA, G. I. N.; SOUZA, L. S. B.; SILVA, T. G. F. Uma abordagem sobre práticas agrícolas resilientes para maximização sustentável dos sistemas de produção no Semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 1, n1, p. 373-392, 2022.

AMORIM, D. M. et al. Fenofases e momento de corte de palma forrageira sob irrigação e sistemas de plantio. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, v. 47, n. 1, p. 62–71, 2017.

ARAÚJO, S. M. S. A região semiárida do nordeste do Brasil: Questões ambientais e possibilidades de uso sustentável dos recursos. **Rios Eletrônica – Revista Científica da FASETE**. ano 5, n. 5. 2011.

ARAÚJO, E. D. S.; MACHADO, C. C. C.; SOUZA, J. O. P. Considerações sobre as paisagens semiáridas e os enclaves subúmidos do nordeste seco: Uma abordagem sistêmica. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 36, no .3, 2019.

BARRETO, L. V., BARROS, F. M., BONOMO, P., ROCHA, F. A., AMORIM, J. S., EUTROFIZAÇÃO EM RIOS BRASILEIROS, Enciclopédia Biosfera, Centro Universitário Conhecer - Goiânia, v.9, n.16, p.2165-2179, 2013.

BATISTA, P. H. D.; MONTENEGRO, A. A. A.; ALMEIDA, G. L. P.; TAVARES, U. E.; RODRIGUES, R. A. S. Variabilidade espacial da resistência à penetração e teor de água em Neossolo cultivado com banana no Agreste pernambucano. **Revista Engenharia na Agricultura**, v.27, n.1, p.54-60, 2019.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. Ed. 9. São Paulo: Ícone, 2014.

BEZERRA, D. E. L., LIMA FILHO, P., PEREIRA JÚNIOR, E. B., AZEVEDO, P. R. L., SILVA, E. A., Reúso de água na irrigação de mudas de mamoeiro no Semiárido brasileiro, **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Vol. 14, Nº. 1, 2019, págs. 5-11, 2019.

BORGES, T.K.S.; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, T. E. M.; Silva, D.D.; SILVA JUNIOR, V. P. Influência de práticas conservacionistas na umidade do solo e no cultivo do milho (*Zea mays* L.) em semiárido nordestino. **Revista Brasileira de Ciência do Solo (Impresso)**, v.38, p.1862 - 1873, 2014.

BORLAND, A. M. et al. Engineering crassulacean acid metabolism to improve water-use efficiency. **Trends in Plant Science**, v. 19, n. 5, p. 327–338, 2014.

BRANDÃO, V. S.; CECÍLIOMR. A.; PRUSKI, F. F.; da SILVA, D. D. Infiltração da água no solo. 3 ed. Viçosa: Editora UFV, 2006.

BRASIL. **Resolução 115 de novembro de 2017**. Conselho deliberativo da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE. Recife. 2017. Disponível em <<http://sudene.gov.br/images/arquivos/semiario/arquivos/infografico-semiarido-delimitacao.png>>. Acessado em janeiro de 2021.

BRASIL. Acervo digital geográfico e populacional do semiárido nordestino. Instituto Nacional do Semiárido e Sistema de Gestão da Informação e do Conhecimento do Semiárido Brasileiro - INSA/SIGSAB, 2010.

BRASIL, Decreto n 9.414, de 19 de junho de 2018, Institui o Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos do Brasil. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/decreto/d9414.htm>, acesso: 13/04/2022, 22:38.

CAMPOS, F. S. et al. Alternativa de forragem para caprinos e ovinos criados no semiárido. **Nutritime Revista Eletrônica**, v. 14, n. Abril, p. 5004–5013, 2017.

CARVALHO, A. A.; MONTENEGRO, A. A.A.; ASSIS, F.M.C.V.; TABOSA, J. N.; CAVALCANTI, R. Q.; ALMEIDA, T.A.B. Spatial dependence of attributes of rainfed maize under distinct soil cover conditions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.23, p.33 - 39, 2019.

CARVALHO, A. A.; MONTENEGRO A. A. A.; TABOSA, J. N.; ALMEIDA, T. A. B.; SILVA, A. G. O.; SILVEIRA, A. V. M. Reuso hidroagrícola: uma solução para convivência com a escassez hídrica no Sertão e Agreste pernambucano. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v.05, n.02, p. 140-150, 2020.

CASTRO, F. C.; SANTOS, A. M. Salinidade do solo e risco de desertificação na região semiárida. **Mercator (Fortaleza)**, v. 19, 2020.

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº 54 de 28 de novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para prática de reuso direto não potável de água e dá outras providências. Brasília, DF, 2005.

CONAMA. **Resolução nº. 375 de 29 de agosto de 2006**. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Brasília, DF, 2006.

CORRÊA, M. M., CAVALCANTI, M. C., PRIMO, D. C., NETO, F. C. R., MARTINS, J. M., MENEZES, R. S. C., ANTONINO, A. C. D., MENDES, I. S., MEDEIROS, L. R. S., Wastewater reuse in irrigation: short-term effect on soil carbon and nitrogen stocks in Brazilian semi-arid region, *Revista Ambiente e Água*. v. 16, n. 1, 2021.

DANTAS, D. C.; SILVA, E.F.F.; DANTAS, M. S. M.; SILVA, G. F.; LIRA, R. M.; SILVA FILHO, A. D. Crescimento e produção do girassol irrigado com águas residuárias domésticas em região semiárida. **IV INOVAGRI International meeting**, 2017.

DINH, Q. T.; LIANG, D.; THI ANH THU, T.; Le, T. D. H.; DINH VUONG, N.; PHAM, V. T. Spatial prediction of saline and sodic soils in rice-shrimp farming land by using integrated artificial neural network/regression model and kri-ging. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 64, n. 3, p. 371-383, 2018.

DUBEUX, J. C. B. J. et al. Adubação mineral no crescimento e composição mineral da palma forrageira –Clone IPA-201. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 5, n. 1, p. 129–135, 2010

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Produção de caprinos e ovinos no Semiárido. Petrolina: Embrapa Semiárido, p.553, 2011.

FERRAZ, R. L.; COSTA, J.; DANTAS NETO, F. A.; ANJOS, N. P.; BARRETO, L. S.; SOARES, I. D.; MAGALHÃES, M. A.; BARBOSA. *Opuntia ficus-indica* (L.) mill. (Cactaceae) in climate change scenarios and its potential for wastewater bioremediation in semi-arid regions: a systematic review and meta-analysis. *Am. J. Exp. Agric.*, v. 18, pp. 1-11, 2017.

FILGUEIRAS, R; OLIVEIRA, V. M. R.; CUNHA, F. F.; MANTOVANI, E. C.; SOUZA, E. J. Modelos de curva de retenção de água no solo. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, IRRIGA E INOVAGRI, p. 115-120, 2016.

FUJISAKI, K.; CHEVALLIER, T., CHAPIUS-LARDY, L., ALBRECHT, A., RAZAFIMBELO, T.; MASSE, D.; CHOTTE, J. L. Soil carbon stock changes in tropical

croplands are mainly driven by carbon inputs: A synthesis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 259, p. 147-158, 2018.

GAMA D. C.; JESUS, J. B. Principais solos da região semiárida do Brasil favoráveis ao cultivo do Eucalyptus L'Heritier. **BIOFIX Scientific Journal**, v.5, n. 2, p. 214-221, 2020.

GUIMARÃES, T. R.F. C.; COSTA, J.P.N; MEDEIROS, J.F. Uso de água de esgoto doméstico tratado na produção de sorgo soca. **Water Resources and Irrigation Management**, v.7, n.1, p.01 – 07, Jan – Abr, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Estimativas de população**, 2019. Disponível em: < <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6579>>. Acessado em fevereiro de 2021.

KONIG, A., CEBALLOS, B. S. O., SANTOS, A. V., CAVALCANTE, R. B., ANDRADE, J. L. S., TAVARES, J. L., USO DE ESGOTO TRATADO COMO FONTE DE ÁGUA NÃO CONVENCIONAL PARA IRRIGAÇÃO DE FORRAGEIRAS, ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 19o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, V.33, p.2072-2081, 1997.

LEPSCH, I. F. 19 lições de pedologia. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LEPSCH, I. F. Formação e conservação de solos. Oficina de Textos, 2 ed. São Paulo, 2010.

LI, R.; HOU, X.; JIA, Z.; HAN, Q.; REN, X.; YANG, B. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China. **Agricultural Water Management**, v. 116, p. 101- 109, 2013.

LIMA, A. S. DE et al. CONSUMO HÍDRICO E EXIGÊNCIA TÉRMICA DA PALMA FORRAGEIRA EM AMBIENTE SEMIÁRIDO. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 110–128, 2021.

LIMA, C. A.; MONTENEGRO, A. A. DE A.; LIMA, JOÃO L. M. P. D.; ALMEIDA, T. A. B.; SANTOS, J. N. Uso de coberturas alternativas do solo para o controle das perdas de solo em regiões semiáridas. **Engenharia Sanitária e Ambiental (Online)**, v. 25, p. 531-542, 2020.

LIMA, L. C. M.; SANTOS, T. E. M.; SOUZA, E. R.; OLIVEIRA, E. L. Práticas de manejo e conservação do solo: Percepção de agricultores da Região Semiárida pernambucana. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**. v.11, n.4, p. 148-153, 2016.

LIRA, R. M.; SANTOS, A.; SILVA, J. S.; BARNABÉ, J. M. C.; BARROS, M. S.; SOARES, H. R. A utilização de águas de qualidade inferior na agricultura irrigada. **Revista Geama**, v.1, p.341–362, 2015.

LOPES, I.; MONTENEGRO, A. A. A.; DE LIMA, J. L. M. P. Performance of Conservation Techniques for Semiarid Environments: Field Observations with Caatinga, Mulch, and Cactus Forage Palma. **Water**, v. 11, p. 792-807, 2019.

LOPES, L. A. et al. Palma forrageira na alimentação de ruminantes Nopal en la alimentación de rumiantes. **Pubvet**, v. 13, n. 2, p. 1–10, 2019.

MARENGO J. A.; ALVES, L. M.; BESERRA, E. A.; LACERDA F. F. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 2011.

MARINHO JUNIOR, J. L.; LIMA, D. S.; DIAS, J. L. A.; ARAÚJO FILHO, R. N. Análise dos estoques de carbono no solo sob diferentes coberturas vegetais no Brasil (revisão). **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 8, n. 1, p. 31-40, 2020.

MAROUELLI, Waldir Aparecido, SILVA, Washington Luiz de Carvalho, SILVA, Henoque Ribeiro da Irrigação por aspersão em hortaliças: qualidade da água, aspectos do sistema e método prático de manejo - 2 ed. rev. atual. ampl. - Brasília. DF, Embrapa Informação Tecnológica. 2008.

MEDEIROS, L. C.; MEDEIROS, M. R. J. C.; NASCIMENTO, M. T. C. C; SANTOS, J. S. Crescimento de girassol irrigado com água residuária e adubação orgânica. **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia**, 2018.

MEDEIROS, A. S. Fatores de mudança nos estoques de carbono do solo devido ao uso da terra no semiárido brasileiro. 2019. Tese (Doutorado em Agronomia - Produção Vegetal). Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2019.

MEZZOMO, W.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; KIRCHNER, J. H.; TORRES, R. R.; BEM, L. H. B. Comparação dos modelos de Campbell e de van Genuchten para a determinação de curva de retenção de água em diferentes solos. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada** v.12, nº.1, p. 2395 - 2405, 2018.

MINHAS, P. S.; RAMOS, T. B.; BEN-GAL, A.; PEREIRA, L. S. Coping with salinity in irrigated agriculture: Crop evapo-transpiration and water management issues. **Agricultural Water Management**, v. 227, p. 105832, 2020.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA), PROGRAMA NACIONAL DE MANEJO SUSTENTÁVEL DO SOLO E DA ÁGUA EM MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS, Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Rural e Irrigação, Brasília, 2021.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA), PLANO SETORIAL PARA ADAPTAÇÃO À MUDANÇA DO CLIMA E BAIXA EMISSÃO DE CARBONO NA AGROPECUÁRIA COM VISTAS AO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (2020-2030), Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Rural e Irrigação, Brasília, 2021.

MONTENEGRO, A. A. A.; ABRANTES, J.R.C.B.O. ; LIMA, J.L.M.P ; SINGH, V. ; SANTOS, T. E . Impact of Mulching on Soil and Water Dynamics under Intermittent Simulated Rainfall. **Catena (Cremlingen)**, v. 109, p. 139-149, 2013.

MONTENEGRO, A. A. A.; LOPES, I.; ALMEIDA, T. A. B.; LIMA, J. L. M. P.; MONTENEGRO, H. G. L. A.; ARAÚJO, B. G. Impacto de métodos naturais para conservação de água e solo no semiárido brasileiro. **Revista FAVE – Ciências Agrárias**, v.19, n.2, p. 45-59, 2020.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.30 - 37, 2006.

MONROE, P. H. M.; BARRETO-GARCIA, P. A. B., BARROS, W. T., OLIVEIRA, F. G. R. B.; PEREIRA, M. G.. Physical protection of soil organic carbon through aggregates in different land use systems in the semi-arid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 186, p. 104427, 2021.

NASCIMENTO, S. M. DO et al. Aspectos gerais da palma forrageira e alternativas de manejo : uma associação do hidrogel agrícola e da adubação foliar. **Nutri Time**, v. 17, n. 2, p. 8681–8698, 2020.

NIÑEROLA, V. B.; NAVARRO-PEDREÑO, J.; LUCAS, I. G.; PASTOR, I. M.; VIDAL, M. M. J. Geostatistical assessment of soil salinity and cropping systems used as soil phytoremediation strategy. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 174, p. 53-58, 2017.

NUNES, J. D. S. L. et al. Morfogênese da palma forrageira sob modificação do ambiente de crescimento. **Agrometeoros**, v. 27, n. 2, p. 367–375, 2020.

O PronaSolos e seus objetivos, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, Disponível em: <<https://www.embrapa.br/pronasolos/sobre-o-programa>>, acesso: 13/04/2021, 22:33.

OLIVEIRA, D. P.; SARTOR, L. R.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; CORRÊA, M. M.; ROMERO, R. E.; ANDRADE, G. R. P.; FERREIRA, T. O. Weathering and clay formation in semi-arid calcareous soils from Northeastern Brazil. **Catena**, v. 162, p. 325–332, 2018.

PESSOA, D. V. et al. Forage cactus of the genus *Opuntia* in different with the phenological phase: Nutritional value. **Journal of Arid Environments**, v. 181, n. January, 2020.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera: Conceitos, Processos e Aplicações**. 3 ed. Barueri, SP: Editora Manole, 2016.

RODRIGUES, M. S.; ALVES, D. C.; CUNHA, J. C.; LIMA, A. M. N.; CAVALCANTE, I. H. L.; DA SILVA, K. A.; DE MELO JUNIOR, J. C. F. Spatial analysis of soil salinity in a mango irrigated area in semi-arid climate region. **Australian Journal of Crop Science**, v. 12, n. 8, p. 1288, 2018.

SALVADOR, K. R. DA S. et al. Intensificação de sistemas de produção de palma forrageira por meio de consorciação rotativa com gramíneas, leguminosas e oleaginosas: uma revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 4, p. 2322–2343, 2021.

SAMPAIO, E. V. S. B.; COSTA, Tânia Lúcia. Estoques e fluxos de carbono no semi-árido nordestino: estimativas preliminares. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 1, p. 1275-1291, 2011.

SANTOS, T. E. M.; SILVA, D.D.; MONTENEGRO, A. A. A. Temporal variability of soil water content under different surface conditions in the semiarid region of Pernambuco State. **Revista Brasileira de Ciência do Solo (Impresso)**. v.34, p.1733 - 1741, 2010.

SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, D. D. Umidade do solo no semiárido pernambucano usando-se reflectometria no domínio do tempo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 7, p. 670-679, 2011.

SHANKAR, V.; EVELIN, H. Strategies for reclamation of saline soils. In: Giri, B.; Varma, A. (ed.). **Microorganisms in saline environments: Strategies and functions**. Cap. 19, Cham: Springer. p.439- 449, 2019.

SILVA, J. O. N. DA et al. Cultivo de genótipos de palma forrageira sob agricultura bioessalina como alternativa para incremento do aporte forrageiro do semiárido brasileiro : Uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 5, p. 1–14, 2021

SILVA, J. R. I.; SOUZA, R. M. S.; SANTOS, W. A.; ALMEIDA, A. Q.; SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D. Aplicação do método de Budyko para modelagem do balanço hídrico no semiárido brasileiro. **Scientia Plena**, v. 13, n. 10. 2017.

SILVA, F. F.; SOUZA, T. E. M. S.; SOUZA, E. R.; CORREA, M. M.; ROLIM, M. M. Surface sealing and water erosion of soils with mulching in the semi-arid region of Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, n.4, p.277-284, 2019b.

SILVA, M. V.; ALMEIDA, G. L. P.; MONTENEGRO, A. A. A.; PANDORFI, H.; BATISTA, P. H. D.; SILVA, R. A. B.; MACÊDO, G. A. P. A.; ROLIM, M. M.; SANTANA, T. C.; CAVALCANTI, S. D. L. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e produção de palma forrageira no semiárido pernambucano. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 2, p. 7631-7643, 2020.

SOUZA, M. DE S. et al. Practices for the improvement of the agricultural resilience of the forage production in semiarid environment: a review. **Amazonian Journal of Plant Research**, v. 3, n. 4, p. 417–430, 2019.

TONDOH, J. E.; OUÉDRAOGO, I.; BAYALA, J.; TAMENE, L.; SILA, A.; VAGEN, T.-G.; KALINGANIRÉ, A. Soil organic carbon stocks in semi-arid West African drylands: implications for climate change adaptation and mitigation. **Soil Discuss.**, p.1-41, 2016.

TROLEIS, A. L.; SANTOS, A. C. V. **Estudos do Semiárido**. 2 ed. Natal: EDUFRRN, 2011.

UNITED NATIONS - UN. ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. 2015. **17 Objetivos para Transformar Nosso Mundo**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>>. Acesso em: 5 Jan 2021.

VERONESI, F. & SCHILLACI, C. Comparison between geostatistical and machine learning models as predictors of topsoil organic carbon with a focus on local uncertainty estimation. **Ecological Indicators**, v. 101, p. 1032-1044, 2019.

VIEIRA, R. M. S. P.; TOMASELLA, J.; ALVALÁ, R. C. S.; SESTINI, M. F.; AFFONSO, A. G.; RODRIGUEZ, D. A.; BARBOSA, A. A.; CUNHA, A. P. M. A.; VALLES, G. F.;

CREPANI, E.; OLIVEIRA, S. B. P.; SOUZA, M. S. B.; CALIL, P. M.; CARVALHO, M. A.; VALERIANO, D. M.; CAMPELLO, F. C. B.; SANTANA, M. O. Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. **Solid Earth**, v. 6, p. 347-360, 2015.

VICENTE, L. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; Gama-Rodrigues, A. C.; MARCIANO, C. R. Organic carbon within soil aggregates under forestry systems and pasture in a southeast region of Brazil. **Catena**, v. 182, p. 104-139, 2019.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F. et al. (Ed.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: SBCS, 2000. v. 1, cap.1, p.1-54. 2000.

VIEIRA, S. R.; XAVIER, M. A.; GREGO, C. R. Aplicações de geoestatística em pesquisas com cana-de-açúcar. Embrapa Monitoramento por Satélite-Capítulo em livro científico (ALICE), 2008.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. Geoestatística: conceitos e aplicações. Oficina de textos, 2015.

YANG, L. et al. Biomass characterization of Agave and Opuntia as potential biofuel feedstocks. **Biomass and Bioenergy**, v. 76, p. 43–53, 2015.

WANG, Z.; JIN, M. SIMUNEK, J.; VAN GENUTCHTEN, M. Evaluation of mulched drip irrigation for cotton in arid Northwest China. **Irrigation Science**, v. 32, n. 1, p. 15-27, 2014.

ZHANG, Z.; LI, Z.; LIU, L.; WANG, Y; LI, Y. Influence of mulched drip irrigation on landscape scale evapotranspiration from farmland in an arid area. **Agricultural Water Management**, v. 230, p. 105953, 2020.

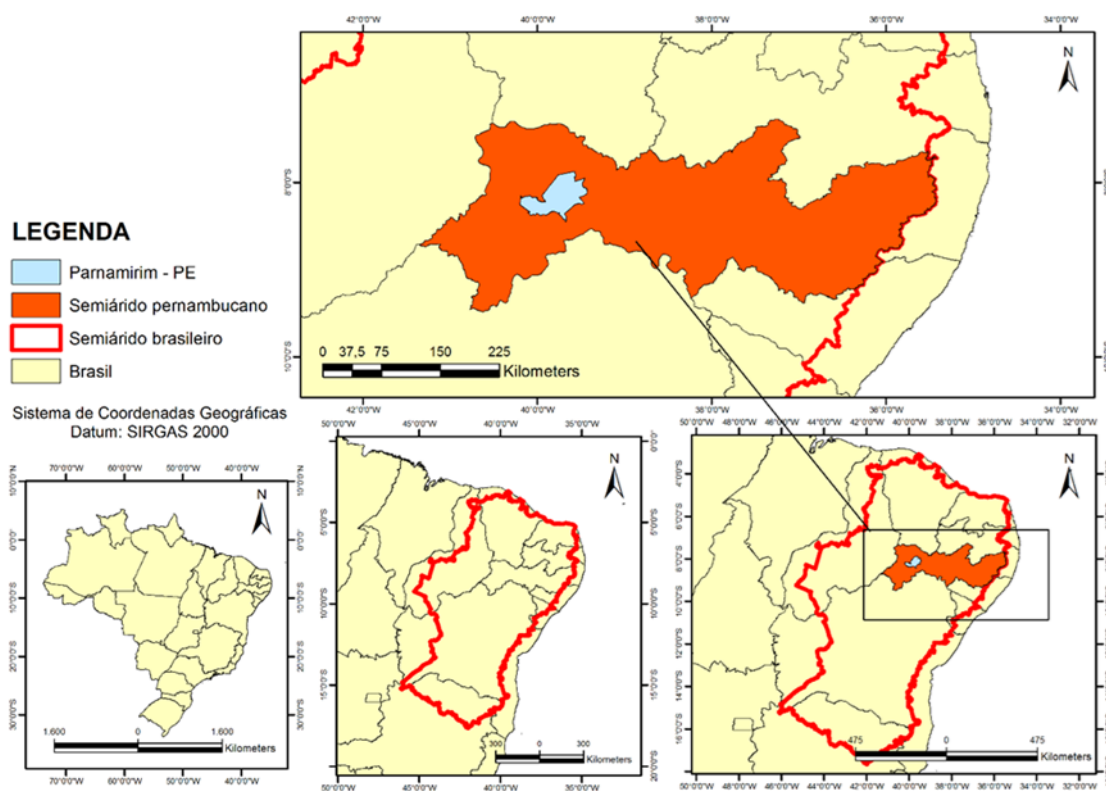
ZRIBI, W.; ARAGUÉS, R.; MEDINA, E.; FACI, J. M. Efficiency of inorganic and organic mulching materials for soil evaporation control. **Soil & Tillage Research**. 148, p. 40-45, 2015.

CAPÍTULO II: CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

1 ESQUEMA DE AMOSTRAGEM E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

O estudo ocorreu em Parnamirim-PE, região semiárida do Brasil, na Fazenda Primavera, distante aproximadamente 560 km de Recife – PE, com as coordenadas 8°5'45''S; 39°35'52''O (Figura 5). A área experimental está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Brígida, afluente do Rio São Francisco.

Segundo a classificação de Köppen, o clima nesta região é do tipo BSh (ALVARES et al., 2013). A temperatura média do município é de 26 °C, e com 569 mm de precipitação anual média, distribuídas principalmente entre dezembro e março, e evapotranspiração potencial de aproximadamente 1600 mm. O solo é um Neossolo Flúvico (LINS et al. 2020; LOPES & MONTENEGRO, 2019; SOUZA et al., 2017), situado na planície aluvial do Rio Brígida.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 5 - Localização do Município de Parnamirim -PE, em relação ao Brasil e ao semiárido brasileiro.

A unidade experimental foi composta por uma área de 41 x 58 m, ocorreu preparo de solo, constituído de aração e gradagem mecanizada em 22 de abril de 2021 (Figura 6) e no período de 1 de maio até 11 de maio de 2021, foram plantadas em fileira dupla a palma forrageira (*Opuntia sp*), onde o espaçamento entre plantas foi de 0,5 x 0,5 m, e a distância entre as fileiras foi de 1,5 m. É importante ressaltar que a área anteriormente era utilizada a pelo menos 5 anos para cultivo de milho.



Figura 6 - Preparo de solo na área experimental da Fazenda Primavera.

Para a realização do teste de infiltração e amostragem de solo, foi estabelecida uma malha amostral com 48 pontos e suas coordenadas definidas (Figura 7). Para a determinação da densidade do solo, coletou-se amostras não deformadas nos 48 pontos amostrais, levou para estufa e relacionou a massa do solo seco com o volume do cilindro no qual o solo foi coletado.

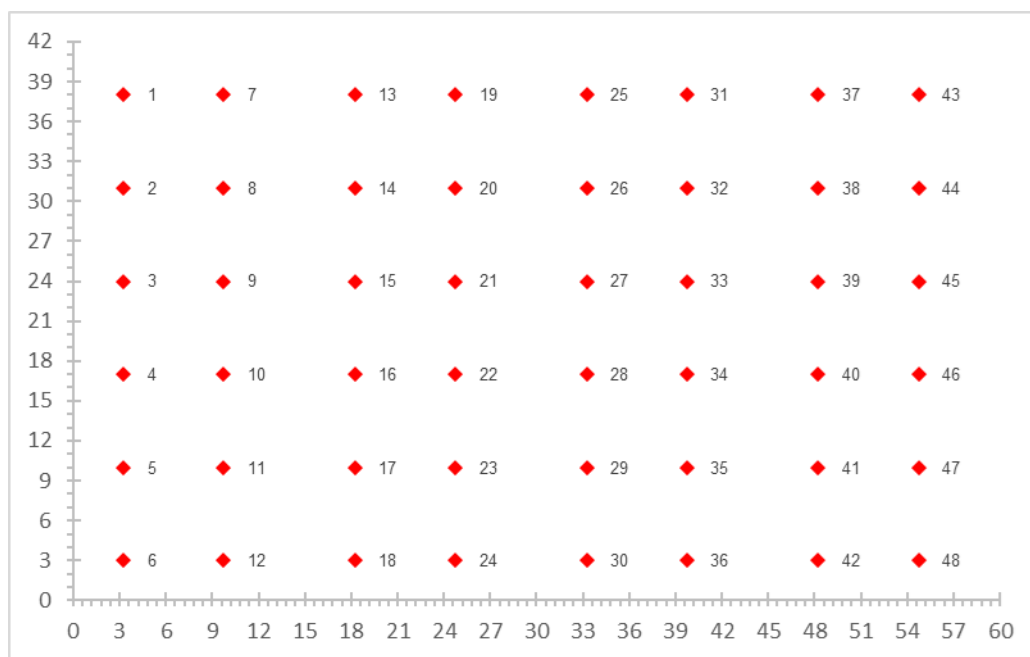


Figura 7 - Malha dos pontos amostrais para teste de infiltração e amostragem de umidade, densidade, carbono orgânico e condutividade elétrica do solo.

As metodologias do hidrômetro de Bouyoucos e o Triângulo Textural foram utilizados para caracterização textural do solo, no qual foram estabelecidos 24 pontos amostrais (Figura 8) para a coleta de solo e em seguida as amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Água e Solo (LAS) do Departamento de Engenharia Agrícola (DEAGRI), pertencente a Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE).

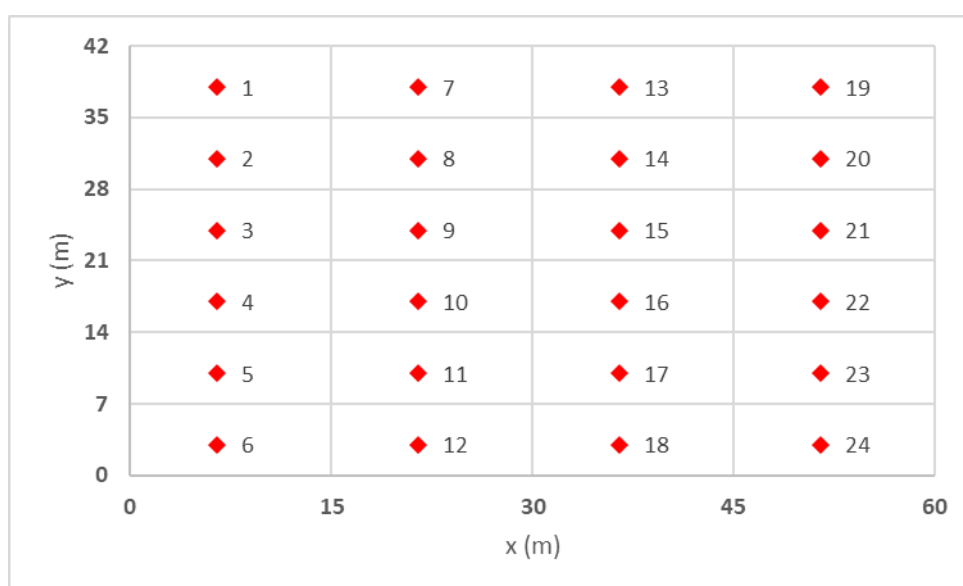


Figura 8 - Malha dos pontos amostrais para análise da textura do solo.

A análise estatística e a aderência à distribuição Normal, segundo o teste de Kolmogorov-Smirnov, foram realizadas para as variáveis da densidade e textura do solo, a seguir a variabilidade dos atributos foi classificada por meio dos valores do coeficiente de variação, segundo Warrick & Nielsen (1980), como baixa ($CV < 12\%$), média ($12 \leq CV \leq 62\%$) e alta ($CV > 62\%$). Estudos com foco na variabilidade espacial das propriedades físicas, químicas e hidráulicas dos solos têm muita força na literatura, principalmente como subsídio para o manejo inteligente da água e do solo em perímetros irrigados (SOUZA et al., 2008).

2 RESULTADOS

A textura do solo da área experimental foi classificada como franco argilo siltoso, de acordo com o triângulo textural utilizando-se as médias dos teores granulométricos, 0,79% ($\pm 0,14\%$) de areia total; 29,40% ($\pm 5,70\%$) de argila e 69,81% ($\pm 5,77\%$) de silte (Figura 9). O silte em grande quantidade no solo ocasiona uma redução na infiltração, pois possui uma baixa capacidade para a formação dos agregados, podendo causar entupimento nos poros das camadas mais inferiores (BRANDÃO et al. 2006). Para a densidade do solo encontrou-se o valor médio de $1,22 \text{ g.cm}^{-3}$ ($\pm 0,14$) (Tabela 2).

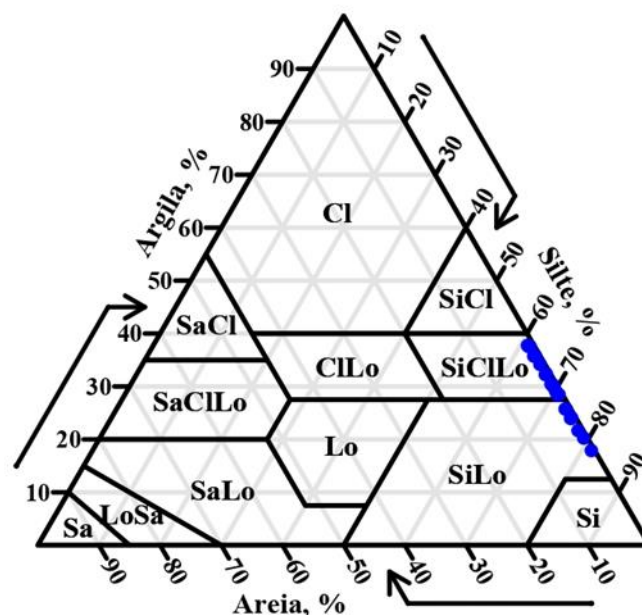


Figura 9 - Triângulo textural e os pontos amostrados para a caracterização da textura do solo da área experimental.

Tabela 2 - Caracterização granulométrica e densidade do solo da área experimental.

	Areia (%)	Argila (%)	Silte (%)	Ds (g.cm⁻³)
Média	0,79	29,40	69,81	1,22
Mediana	0,79	29,94	69,38	1,20
D.P	0,14	5,70	5,77	0,14
C.V (%)	17	19	8	12

Ds: Densidade do solo; D.P: Desvio Padrão; C.V: Coeficiente de Variação.

Os dados apresentaram normalidade pelo método de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade. O coeficiente de variabilidade para a textura do solo obteve a classificação média para os valores de areia e argila, o que pode ser observado no triângulo textural representado na Figura 6, no qual a classificação da textura do solo encontra-se entre duas categorias quando analisados individualmente os pontos. A densidade do solo também apresentou média variabilidade (12%), enquanto o silte apresentou baixa variabilidade (8%).

Segundo Santos et al. (2012), o uso diversificado do solo com a introdução de equipamentos agrícolas, bem como os processos geomorfológicos de transporte e sedimentação, que conferem uma melhor homogeneização das percentagens de areia e argila, contribuem para esta variabilidade média. É comum encontrar a variabilidade, particularmente em planícies aluviais criadas por deposições consecutivas de material com texturas variadas. Foi observado na área experimental, disparidades perceptíveis de textura e características hidráulicas, típicas das planícies de inundação dos rios.

3 DELINEAMENTO PARA FUTUROS ESTUDOS

O manejo inadequado da produção agrícola no semiárido brasileiro, bem como suas limitações frente às mudanças climáticas, compromete a estabilidade socioeconômica e ambiental da região. O manejo integrado de técnicas agronômicas melhora os sistemas agrícolas, permitindo-lhes enfrentar choques climáticos e ambientais e melhorando a capacidade de resiliência desses locais (ALVES et al., 2022). Desse modo, para futuros estudos na área experimental foi realizado um sorteio de tratamentos, foram considerados 4 blocos e 6 tratamentos por bloco (Figura 10), no qual se diferenciavam por ausência ou

presença de cobertura morta e o tipo de consórcio implantado, são eles consórcios de palma forrageira (*Opuntia sp.*) com moringa (*Moringa oleífera*), sorgo (*Sorghum bicolor*) e gliricídia (*Gliricidia sepium*) (Tabela 3).

Ao compilar informações sobre o consórcio da palma e sorgo no semiárido, Alves et al. (2021) concluem que suas combinações no sistema de produção permitem melhor aproveitamento dos recursos naturais e, conseqüentemente, maiores acúmulos de biomassa, que são variáveis determinantes para o sucesso da produção. Alves et al. (2022) destacam a importância de incentivar novas pesquisas com a utilização de sistemas consorciados em ambiente semiárido com palma forrageira e gramíneas, integradas às práticas agrônômicas, com o objetivo de melhorar os sistemas e favorecer a estabilidade da forragem e o retorno econômico aos produtores, seja por meio da venda de matéria-prima ou produtividade animal.

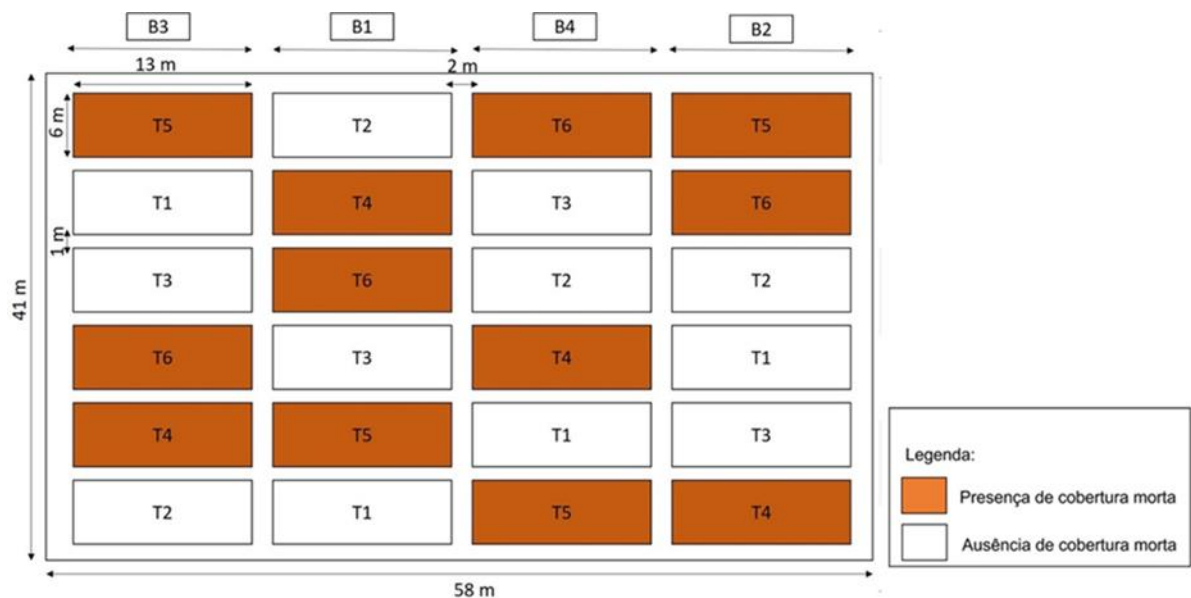


Figura 10 - Croqui da área experimental, irrigada com efluente tratado.

Tabela 3 - Sorteio dos cultivos dos tratamentos

Nomenclatura	Tratamento
T1	Ausência de cobertura morta Plantio: Palma forrageira + Moringa
T2	Ausência de cobertura morta Plantio: Palma forrageira + Gliricídia
T3	Ausência de cobertura morta Plantio: Palma forrageira + Sorgo
T4	Presença de cobertura morta Plantio: Palma forrageira + Moringa
T5	Presença de cobertura morta Plantio: Palma forrageira + Gliricídia
T6	Presença de cobertura morta Plantio: Palma forrageira + Sorgo

Em uma grade de 1 m², foram capturadas imagens digitais para obtenção do índice de área coberta ao longo da superfície. Para realizar o processamento das imagens foi utilizado o software ArcGIS.

A porcentagem de superfície coberta pela vegetação disponível foi igual a 88.70%, obtendo-se 11.29% de área exposta (Figura 11). Ainda que a cobertura auxilie na redução da evapotranspiração, na preservação e retenção de água no solo (MONTENEGRO et al., 2013), a necessidade de pré-trituração do material que será utilizado como cobertura do solo é ressaltada por Araújo et al. (2019), pois isso evitará que as folhas acumulem parte significativa da água em suas estruturas, limitando a quantidade de água que infiltra no solo.

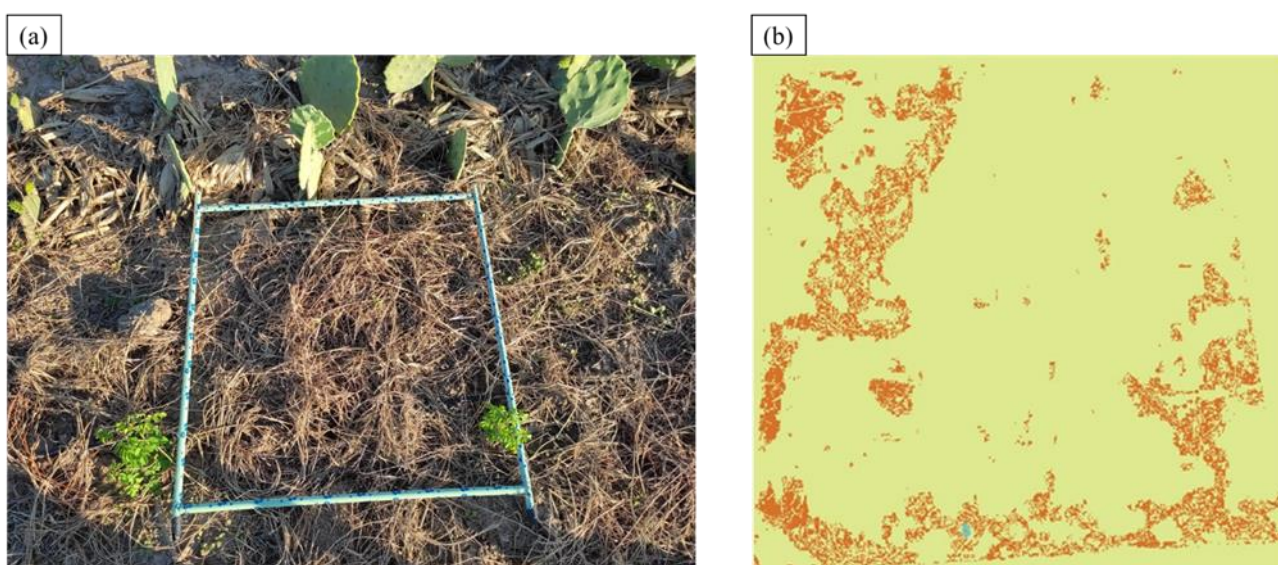


Figura 11 - (a) Área determinada por moldura de 1m² para avaliação da área coberta; (b) análise realizada no software ArcGIS.

O objetivo é que essas culturas sejam irrigadas por gotejamento com efluente doméstico tratado, em estação de tratamento operada pela Companhia de Água e Saneamento de Pernambuco- COMPESA (Figura 12). Com a disposição de proporcionar benefícios agrícolas decorrentes do tratamento e destinação adequados de efluentes, ocasionando a segurança alimentar humana e animal no semiárido.



Figura 12 - Localização da área experimental nas proximidades da BR 316 e margens do Rio Brígida. Vista da Estação de Tratamento de Esgoto operada pela COMPESA, no município de Parnamirim-PE.

4 CRONOGRAMA DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS NO PERÍODO DO MESTRADO.

Na Tabela 4, estão as principais atividades realizadas em campo para a construção dessa dissertação e seus respectivos meses. Observa-se que o plantio da palma só está marcado no mês de maio, porém ocorreram replantios das palmas sempre que a equipe do INSA, que estava em campo, julgava necessário.

Tabela 4 - Cronograma das atividades realizadas em campo.

Atividades	abr/21	mai/21	jun/21	jul/21	ago/21	set/21	out/21	nov/21	dez/21
Preparo do solo	X								
Plantio da Palma		X							
Teste Beerkan			X						
Coleta de solo: Textura do solo			X						
Coleta de solo: Condutividade elétrica e carbono orgânico				X	X				
Plantio Consórcios								X	
Implementação da cobertura morta									X
Monitoramento da umidade									X

5 CONCLUSÕES

A textura do solo foi classificada como franco argilo siltoso, apresentou média variabilidade para os teores granulométricos de areia e argila.

Essa caracterização inicial do solo e seus pontos de amostragens servirão como base para o desenvolvimento dessa dissertação e para futuros estudos na área experimental de Parnamirim-PE.

No capítulo III, estão os dados referentes a campanha realizada para o teste de infiltração pelo método do Beerkan. No capítulo IV, estão os dados referentes a condutividade elétrica e o estoque de carbono orgânico na área. E por fim, o capítulo V encontra-se os dados referentes ao monitoramento da umidade do solo, através de sensor, realizado na presença e ausência de cobertura morta.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, p.711-728, 2013.

ALVES, C. P.; SOUZA, L. S. B.; JARDIM, A. M. R. F.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; PINHEIRO, A. G.; SALVADOR, K. R. S.; SILVA, G. I. N.; SILVA, T. G. F. Resiliência agrícola no cultivo consorciado palma-sorgo em ambiente semiárido: uma revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 7, p. 3932-3952, 2021.

ALVES, H. K. M. N.; JARDIM, A. M. R. F.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SOUZA, C. A. A.; LEITE, R. M. C.; SILVA, G. I. N.; SOUZA, L. S. B.; SILVA, T. G. F. Uma abordagem sobre práticas agrícolas resilientes para maximização sustentável dos sistemas de produção no Semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 1, n1, p. 373-392, 2022.

ARAÚJO, E. D. S.; MACHADO, C. C. C.; SOUZA, J. O. P. Considerações sobre as paisagens semiáridas e os enclaves subúmidos do nordeste seco: Uma abordagem sistêmica. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 36, no .3, 2019.

BRANDÃO, V. S.; CECÍLIOMR, A.; PRUSKI, F. F.; da SILVA, D. D. Infiltração da água no solo. 3 ed. Viçosa: Editora UFV, 2006.

LINS, F. A. C.; LOPES; I.; MONTENEGRO, A. A. A. Variabilidade espacial da umidade e condutividade elétrica do solo em vale aluvial utilizando técnicas geofísicas. **Revista de Geociências do Nordeste**, v.6, n.1, p. 56-63, 2020.

LOPES, I. & MONTENEGRO, A. A. A. Spatialization of electrical conductivity and physical hydraulic parameters of soils under different uses in na aluvial valley. **Revista Caatinga**, v. 32, n 1, p. 222-233, 2019.

MONTENEGRO, A. A. A.; ABRANTES, J.R.C.B.O.; LIMA, J.L.M.P ; SINGH, V. ; SANTOS, T. E . Impact of Mulching on Soil and Water Dynamics under Intermittent Simulated Rainfall. **Catena (Cremlingen)**, v. 109, p. 139-149, 2013.

SANTOS, K. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; ALMEIDA, B. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANDRADE, T. S.; FONTES JÚNIOR, R. V. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.8, p.828–835, 2012.

SOUZA, E. R.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, T. E. M.; ANDRADE, T. S.; PEDROSA, E. R. Variabilidade espacial das frações granulométricas e da salinidade em um Neossolo Flúvico do semi-árido. **Ciência Rural**, v.38, n.2, p. 698-704, 2008.

SOUZA, R.; SOUZA, E.; NETTO, A. M.; ALMEIDA, A. Q.; BARROS JÚNIOR, G. B.; INÁCIO SILVA, J. R.; LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D. Assessment of the physical quality of a Fluvisol in the Brazilian semiarid region. **Geoderma Regional**, v.10, p. 175-182, 2017.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field In: Hillel, D. **Applications of soil physics**. New York: Academic, p. 319-344, 1980.

CAPÍTULO III: VARIABILIDADE ESPACIAL HIDRODINÂMICA DO SOLO NO SEMIÁRIDO PELO MÉTODO BEERKAN

FONSECA, A. C. N. Variabilidade espacial hidrodinâmica do solo no semiárido pelo Método Beerkan. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2022.

Resumo

A limitada gestão dos recursos hídricos pode resultar em consequências ambientais e sociais, como a impermeabilização do solo, o que dificulta a infiltração da água e leva ao aumento do escoamento superficial. A infiltração da água no solo está ligada ao conhecimento dos aspectos relativos ao solo, superfície, preparo e manejo. Essas variáveis têm impacto na condutividade hidráulica, que é uma propriedade que traduz o movimento da água no perfil do solo. A metodologia Beerkan é empregada para estimar parâmetros ligados às propriedades do solo. A curva de retenção de água no solo e da condutividade hidráulica podem ser determinadas usando estimativas do método. Devido à capacidade de geração de mapas, a geoestatística como ferramenta de análise leva a uma melhor gestão e desempenho das pesquisas ambientais, permitindo a estimativa de valores em regiões que não foram amostradas. Nesse contexto, o objetivo deste capítulo consistiu em estimar parâmetros hidrodinâmicos do solo para a construção da curva de retenção de água no solo e examinar sua variabilidade espacial, em uma região semiárida de Pernambuco, utilizando-se o Método de Beerkan e Técnicas Geoestatísticas. O estudo ocorreu em Parnamirim -PE, a área experimental está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Brígida, afluente do Rio São Francisco. A unidade experimental foi composta por uma área de 41 x 58 m, no qual foram plantadas em fileira dupla a palma forrageira (*Opuntia* sp). Para a realização do teste de infiltração e amostragem de solo, foi determinada uma malha amostral com 48 pontos e suas coordenadas definidas. A textura do solo da área experimental foi classificada como franco argilo silteoso. A condutividade hidráulica (K_s) não apresentou normalidade e exibiu efeito pepita puro. O uso da geoestatística possibilitou constatar a ausência de dependência espacial para a condutividade hidráulica da área de estudo. O método do Beerkan se mostrou eficiente para a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do solo, bem como na elaboração das curvas de retenção de água no solo e condutividade hidráulica.

Palavras-chave: Infiltração; Condutividade hidráulica; Geoestatística.

FONSECA, A. C. N. Hydrodynamic spatial variability of soil in the semiarid region by the Beerkan method. Dissertation (Master's in Agricultural Engineering) – Federal Rural University of Pernambuco, 2022.

Abstract

The limited management of water resources can result in environmental and social consequences, such as soil sealing, which makes it difficult for water to infiltrate and leads to increased surface runoff. The infiltration of water in the soil is linked to the knowledge of aspects related to the soil, surface, preparation and management. These variables have an impact on hydraulic conductivity, which is a property that translates the movement of water in the soil profile. The Beerkan methodology is used to estimate parameters related to soil properties. The soil water retention and hydraulic conductivity curve can be determined using estimates from the method. Due to the ability to generate maps, geostatistics as an analysis tool leads to better management and performance of environmental research, allowing the estimation of values in regions that were not sampled. In this context, the objective of this chapter was to estimate soil hydrodynamic parameters for the construction of the soil water retention curve and to examine its spatial variability, in a semi-arid region of Pernambuco, using the Beerkan Method and Geostatistical Techniques. The study took place in Parnamirim -PE, the experimental area is located in the Brígida River Basin, a tributary of the São Francisco River. The experimental unit consisted of an area of 41 x 58 m, in which forage cactus (*Opuntia* sp) were planted in a double row. In order to carry out the infiltration test and soil sampling, a sampling grid with 48 points and their defined coordinates was determined. The soil texture of the experimental area was classified as silty clay loam. Hydraulic conductivity (K_s) was not normal and showed a pure nugget effect. The use of geostatistics made it possible to verify the absence of spatial dependence for the hydraulic conductivity of the study area. The Beerkan method proved to be efficient for the determination of the hydrodynamic parameters of the soil, as well as for the elaboration of the soil water retention and hydraulic conductivity curves.

Keywords: Infiltration; Hydraulic conductivity; Geostatistics.

1 INTRODUÇÃO

O inadequado gerenciamento dos recursos hídricos pode dar origem a prejuízos de relevância ambiental e social, como impermeabilização do solo dificultando a infiltração da água, tendo como efeito o aumento do escoamento superficial (MACÊDO & SOARES, 2020). A infiltração da água no solo aumenta a disponibilidade hídrica em períodos de estiagem, abastecendo os aquíferos subterrâneos, como também a água infiltrada determina o balanço hídrico na zona radicular das culturas (BRANDÃO et al., 2006), situação que favorece o semiárido, que é caracterizado por chuvas irregulares, alta evapotranspiração e períodos de seca.

O conhecimento dos fatores relacionados ao solo, à superfície, preparo e manejo do solo estão ligados a infiltração de água no solo. Ela depende desses fatores, pois eles exercem influência na condutividade hidráulica, que é uma variável que traduz o movimento da água no perfil do solo através do meio poroso (BRANDÃO et al., 2006). Para a caracterização desse processo pode-se fazer ensaios em laboratório ou em campo. Os métodos de laboratórios possuem custo elevado, são demorados e fornece informações pontuais, sendo muitas vezes incapaz de detectar a heterogeneidade espacial relacionada ao solo, vegetação e clima (SOUZA et al., 2017). Diferentes métodos de campo, com diferentes níveis de complexidade têm sido estudados para determinação das propriedades hidrodinâmicas do solo. Assim, a escolha do método depende tanto da precisão como da complexidade de aplicação.

Dentre os métodos mais utilizados pode-se citar o Beerkan, esse método semifísico propõe a estimativa dos parâmetros da curva de retenção de água no solo e curva de condutividade hidráulica considerando a textura e estrutura do solo (ANGULO-JARAMILLO et al., 2019; SOUZA et al., 2008).

Devido a sua simplicidade de aplicação, o Método Beerkan pode ser utilizado para o monitoramento em áreas mais suscetíveis à degradação, como o que acontece com os solos do semiárido brasileiro, onde através do monitoramento é possível determinar um manejo adequado (AYANGBENRO & BABALOLA, 2020). Ademais, a utilização de técnicas geoestatística contribui para um melhor manejo e desempenho de pesquisas ambientais, pela capacidade de construção de mapas, futuras amostragens e modelagens, sendo possível estimar valores em locais que não foram amostrados (LEMOS FILHO et al., 2017). Dessa forma, conforme reforçado por Santos et al. (2020), a geoestatística é fundamental para o

estudo da produtividade, eficiência e avaliação de degradação de solos, permitindo identificar as estruturas de dependência espacial.

Com isso, o objetivo do presente capítulo foi estimar os parâmetros hidrodinâmicos do solo, para a construção da curva de retenção de água no solo e estudar a sua variabilidade espacial na unidade experimental de reuso de Parnamirim, utilizando-se o Método do Beerkan e posteriormente executar o mapeamento.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização e amostragem da área de estudo

O estudo ocorreu em Parnamirim -PE, região semiárida do Brasil, na Fazenda Primavera com as coordenadas 8°5'45''S; 39°35'52''O (Figura 5). A área experimental está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Brígida, afluente do Rio São Francisco. Segundo a classificação de Köppen, o clima nesta região é do tipo BSh, A temperatura média do município é de 26 °C, e 569 mm de precipitação anual média, distribuídas principalmente nos meses entre dezembro e março, e evapotranspiração potencial de aproximadamente 1600 mm. O solo é um Neossolo Flúvico (LINS et al. 2020; LOPES & MONTENEGRO, 2019; SOUZA et al., 2017), situado na planície aluvial do Rio Brígida. Como descrito anteriormente na Tabela 4, os testes de infiltração ocorreram no mês de junho de 2021.

A unidade experimental foi composta por uma área de 41 x 58 m, no qual foram plantadas em fileira dupla a palma forrageira (*Opuntia sp*), onde o espaçamento entre plantas foi de 0,5 x 0,5 m, e a distância entre as fileiras foi de 1,5 m. Para caracterização textural do solo foram estabelecidos 24 pontos amostrais para a coleta de solo (Figura 8) e as amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Água e Solo (LAS) do Departamento de Engenharia Agrícola (DEAGRI), pertencente a Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), para determinação da areia, silte e argila, as amostras foram secas ao ar, depois destorroadas e passadas em uma peneira com malha de 2,0 mm. Utilizando-se o método do hidrômetro de Bouyoucos, as frações granulométricas foram determinadas, após essa determinação a caracterização da textura se deu a partir do Triângulo Textural.

2.2 Propriedades hidrodinâmicas do solo

Para a realização do teste de infiltração e amostragem de solo, foi estabelecida uma malha amostral com 48 pontos e suas coordenadas (Figura 7). Utilizando-se da metodologia descrita por Pinheiro et al. (2021), aplicou-se o Método de Beerkan (LASSABATÈRE et al., 2006).

A metodologia de Beerkan é realizada em campo (Figura 13) e posteriormente em laboratório afim de estimar cinco parâmetros, nos quais dois são de forma (m ou n e η) e estão relacionados a textura do solo; e três de normalização (Θ_s , K_s e H_g), que são ligados a estrutura do solo. Através dessas estimativas pode-se construir curva de retenção de água no solo e da condutividade hidráulica no solo, apropriando-se dos modelos matemáticos desenvolvidos por Van Genuchten (1980) e Brooks & Corey (1964) (SOUZA et al., 2008).

O teste de infiltração *in situ*, foi realizado com um cilindro de PVC de diâmetro 200 mm, que teve a funcionalidade de infiltrômetro, proporcionando uma infiltração tridimensional. Ao inserir o cilindro no solo a uma profundidade de 1,0 cm, aproximadamente, são despejados volumes de água conhecidos e cronometra-se o tempo em que cada volume de água é infiltrado no solo, o teste é finalizado quando a taxa de infiltração for constante (Figura 13A). Com esses valores foi possível determinar a curva de infiltração de água no solo em função do tempo. Pinheiro et al. (2021) explicam que o método consiste em levar em consideração apenas as características hidrodinâmicas na superfície do solo, e que a profundidade em que o cilindro é inserido no solo impede que ocorra perda de água pela lateral durante o teste.

Recolhe-se amostras não deformadas de solo, no momento inicial do Teste de Beerkan (Figura 13B). Essas amostras foram vedadas, a fim de não perder umidade. Posteriormente, encaminhadas ao LAS, para análises da umidade volumétrica inicial do solo e a densidade do solo, seguindo a metodologia do Manual de métodos de análises de solos (2017). Essas variáveis são dados de entrada para o método descrito por Lassabatère et al. (2006) entrada para a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do solo com o objetivo de estimar a condutividade hidráulica do solo.

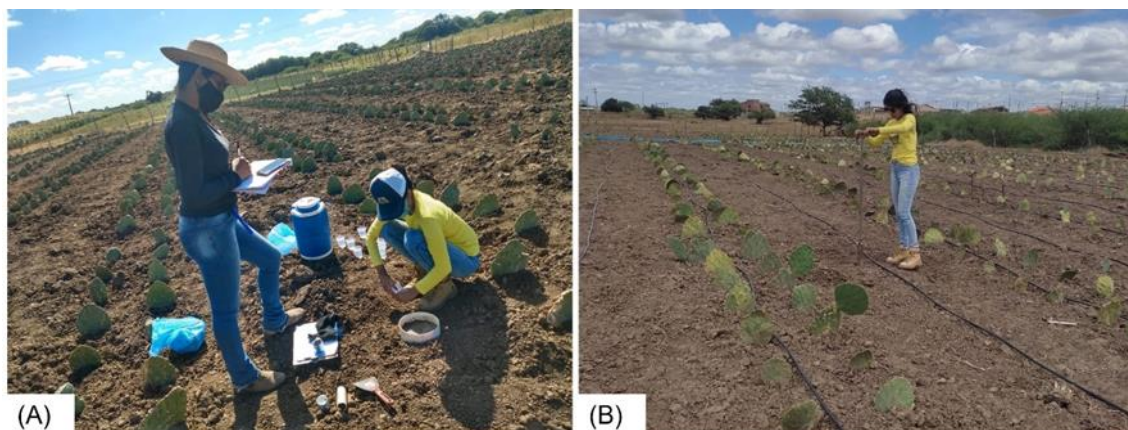


Figura 13 - Amostragem em campo: (A) Teste de infiltração realizado em campo; (B) Coleta de solo com trado caneca.

Na metodologia de Beerkan, pode-se construir a curva de retenção de água no solo $\Theta(h)$, essa curva relaciona o potencial matricial e a umidade do solo, e a curva de condutividade hidráulica $K(\Theta)$, que relaciona a condutividade hidráulica com a umidade do solo. Nesse capítulo serão estudadas essas curvas que vão ser geradas a partir dos parâmetros estimados pelo BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters Through Infiltration of Experiments) software proposto por Lassabatère et al. (2006), para os modelos de Van Genuchten (1980) (Equação 4) e Brooks & Corey (1964) (Equação 5):

$$\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right) = \left[1 + \left(\frac{h}{h_g}\right)^n\right]^m \quad \text{Onde: } m = 1 - \frac{1}{n} \quad (\text{Equação 4})$$

$$K(\theta) = K_s \times \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^\eta \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo:

Θ = umidade volumétrica ($L^3.L^{-3}$)

Θ_r = umidade volumétrica residual ($L^3.L^{-3}$)

Θ_s = umidade volumétrica saturada ($L^3.L^{-3}$)

h = potencial matricial (L)

h_g = valor de escala de h .

m e n = parâmetros de forma

K_s = condutividade hidráulica saturada do solo ($L.T^{-1}$)

η = parâmetro de forma para a curva da condutividade hidráulica.

Seguindo a metodologia proposta por Souza et al. (2017), após a construção da curva de retenção de água no solo, variáveis como capacidade de campo (CC), ponto de murcha

permanente (PMP) e água disponível para a planta (Θ_{disp}) podem ser estimadas para auxiliar na tomada de decisão de irrigação. Para a o cálculo da CC, utilizou-se o matricial -0.03 MPa, em que Souza et al. (2017), explica que esse valor é utilizado para solos argilosos, e para PMP empregou -1.47 MPa. Para o cálculo da Θ_{disp} , operou-se diferença dos teores volumétricos de água entre a CC e o PMP.

O método possui a vantagem de ser econômico e de fácil aplicação, sendo utilizado para representar a infiltração do solo, ajustando matematicamente a curva de infiltração para determinação dos parâmetros da condutividade hidráulica do solo (PINHEIRO et al., 2021).

2.3 Análise de dados

Foi realizada a estatística descritiva dos dados experimentais para determinar a média, mediana, desvio padrão, valores máximos e mínimos, assimetria, curtose e coeficiente de variação. Os dados discrepantes foram eliminados com base no critério de Hoaglin et al. (1992), que considera discrepantes aqueles dados abaixo do limite inferior (Li) (Equação 6a) ou acima do limite superior (Ls) (Equação 6b). Também foi avaliada a normalidade dos dados através do Teste de Kolmogorov-Smirnov ao nível de 5% de probabilidade.

$$Li = Qi - 1,5 \times AP \quad \text{(Equação 6a)}$$

$$Ls = Qs - 1,5 \times AP \quad \text{(Equação 6b)}$$

em que:

Li = Limite inferior;

Ls = Limite superior;

Qi = Quartil inferior;

Qs = Quartil superior;

AP = Amplitude entre o 1^a e o 3^a quartil.

A variabilidade dos dados foi determinada de acordo com uma análise de variância, no qual através do coeficiente de variação (CV), a variabilidade foi classificada, segundo Warrick & Nielsen (1980), como baixa ($CV < 12\%$), moderada ($12\% < CV < 62\%$) e alta ($CV > 62\%$).

Para verificar a presença de tendência nos dados, utilizou-se a metodologia que é descrita por Gonçalves et al. (2001) e Andrade et al. (2012), ajustando-se um polinômio de primeiro ou segundo grau aos dados encontrados, assumindo-se tendência quando o coeficiente de determinação (R^2) for igual ou superior a 70%.

2.4 Análise Geoestatística

Para a análise geoestatística foi utilizado o programa Gs+ (ROBERTSON, 2008). De posse do semivariograma experimental, foram testados os modelos teóricos exponencial, gaussiano e esférico, estimando-se o efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1) e o alcance (A). Os critérios e procedimentos para o ajuste de modelo do semivariograma foram descritos por Vieira et al. (1983). A dependência espacial foi avaliada através do semivariograma clássico construído a partir da estimativa das semivariâncias, dada pela Equação 7 (JOURNEL, 1989).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^n [Z(X_i + h) - Z(X_i)]^2 \quad (\text{Equação 7})$$

em que:

$\hat{\gamma}(h)$ = é o valor estimado da semivariância dos dados experimentais;

$Z(x_i + h)$ e $Z(X_i)$ = são os valores observados da variável regionalizada;

$N(h)$ = o número de pares de valores medidos, separados por uma distância h .
(LANDIM, 2003)

A técnica de validação do semivariograma de Jack Knifing (VAUCLIN et al. 1983) foi utilizada, escolhendo o modelo que apresentou o melhor ajuste, metodologia descrita em Montenegro e Montenegro (2006), utilizando-se o software GEO-EAS (Geostatistical Environmental Assessment Software), nos quais erros com média próxima a zero e desvios padrão próximo a unidade apresentaram a melhor qualidade de ajuste.

Após determinação dos parâmetros A , C_0 e C_0+C_1 , o grau de dependência espacial (GDE) (Equação 8) é calculado e sua classificação é feita de acordo com o que foi proposto por Cambardella et al. (1994), considerando-se forte dependência espacial quando o seu valor é abaixo de 25%, quando o GDE fica entre 25% e 75% é considerada dependência moderada e acima de 75% dependência fraca.

$$GDE = \frac{c_0}{c_0+c_1} \times 100$$

Equação 8

O inverso da potência da distância (IDW) foi utilizado para mapear as variáveis que não possuíam dependência espacial, ou seja, efeito pepita puro. A metodologia atribui pesos em cada um dos n lugares mais próximos e estima a variável em todo o espaço (Di Piazza et al., 2011), ou seja, quanto mais próximo do ponto a ser estimado maior o peso atribuído ao ponto amostrado. No presente estudo foi adotada uma função do inverso de uma potência 2 da distância, ou seja, foi utilizado o Inverso Quadrado da Distância (IQD).

3 RESULTADOS

O solo da área experimental foi classificado como franco argilo siltoso, de acordo com o triângulo textural (Figura 9). O silte em grande quantidade no solo ocasiona uma redução na infiltração, pois possui uma baixa capacidade para a formação dos agregados, podendo causar entupimento nos poros das camadas mais inferiores (BRANDÃO et al. 2006). A partir dos procedimentos em campo, foi possível gerar curvas de infiltração relacionadas com o tempo, I(t) (Figura 14), nos 48 pontos da área amostral. Os testes de infiltração duraram em média 1h15min14s, o teste mais rápido foi de 28min44s e o mais longo de 2h58min37s.

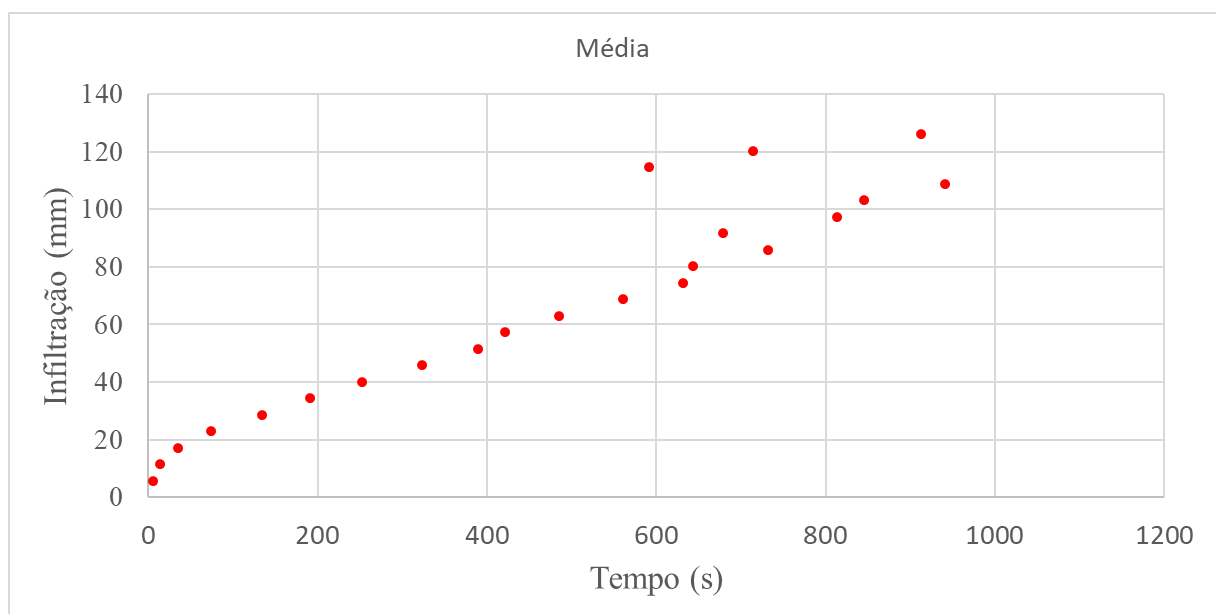


Figura 14 - Curvas de infiltração acumulada relacionadas com o tempo, I(t), dos 48 pontos amostrais.

A partir da curva de $I(t)$, consegue-se estimar os parâmetros para a determinação das curvas de $\Theta(h)$ (Figura 15) e $K(\Theta)$ (Figura 16). Os resultados da estatística descritiva dos dados para os parâmetros ajustados de Van Genuchten (1980) e Brooks & Corey (1964) se encontram na tabela 2.

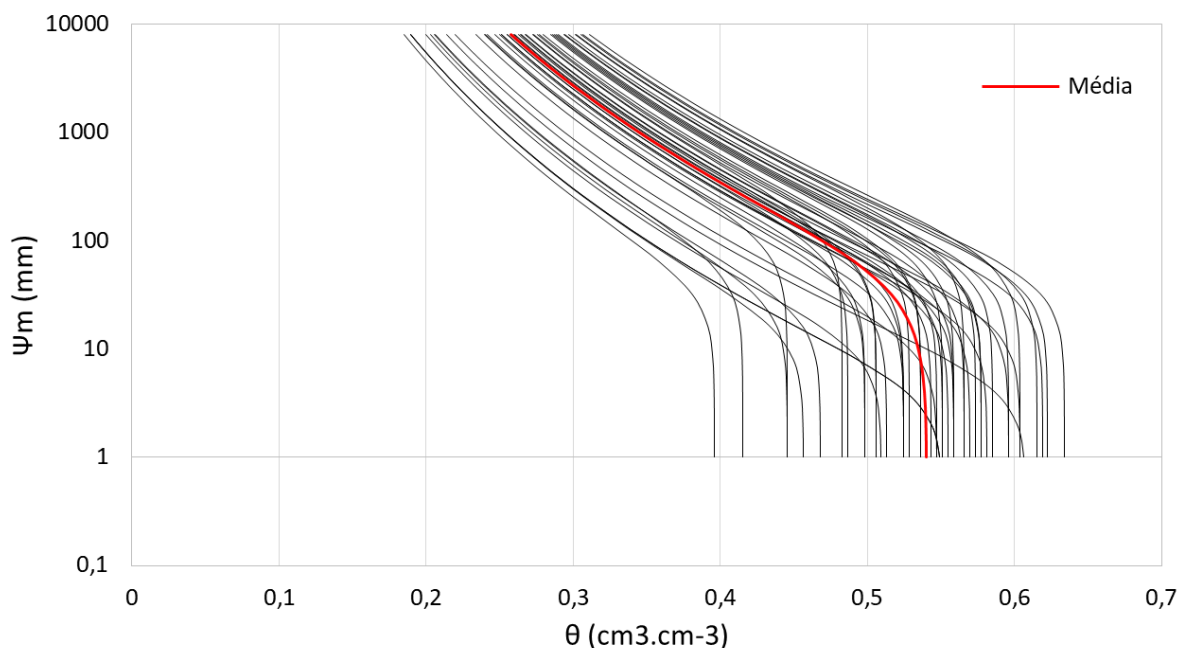


Figura 15 - Curva de retenção de água no solo dos 48 pontos amostrais.

A análise das curvas de retenção de água no solo (Figura 15), a capacidade de campo, ponto de murcha permanente e a água disponível podem ser estimadas, em um potencial próximo de -0,03 MPa para a CC e -1,47 MPa para PMP, foi encontrado valores médios de $0,3 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ($\pm 0,04$) e $0,17 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ($\pm 0,02$), para os respectivos parâmetros. Esses valores entram em acordo com estudo de Salter & Williams (1965), que ao verificar a a relação da umidade com a textura do solo, encontraram os valores de $0,34 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para CC, $0,18 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para o PMP e $0,16 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ para a água disponível para o solo franco argilo siltoso.

Menegaz et al. (2015), buscaram criar uma avaliação espacial das características físicas dos solos em áreas irrigadas em diversas regiões brasileiras, bem como gerar funções de pedotransferência (PTFs) para estimar a retenção de água, desse modo, para o solos com a mesma textura desse experimento, os autores encontraram CC no valor de $0,34 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e PMP igual a $0,21 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$. Para um solo mais argiloso Souza et al. (2017) encontraram $0,036 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ de água disponível, valor abaixo do que encontramos nesse estudo $0,12 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ($\pm 0,02$).

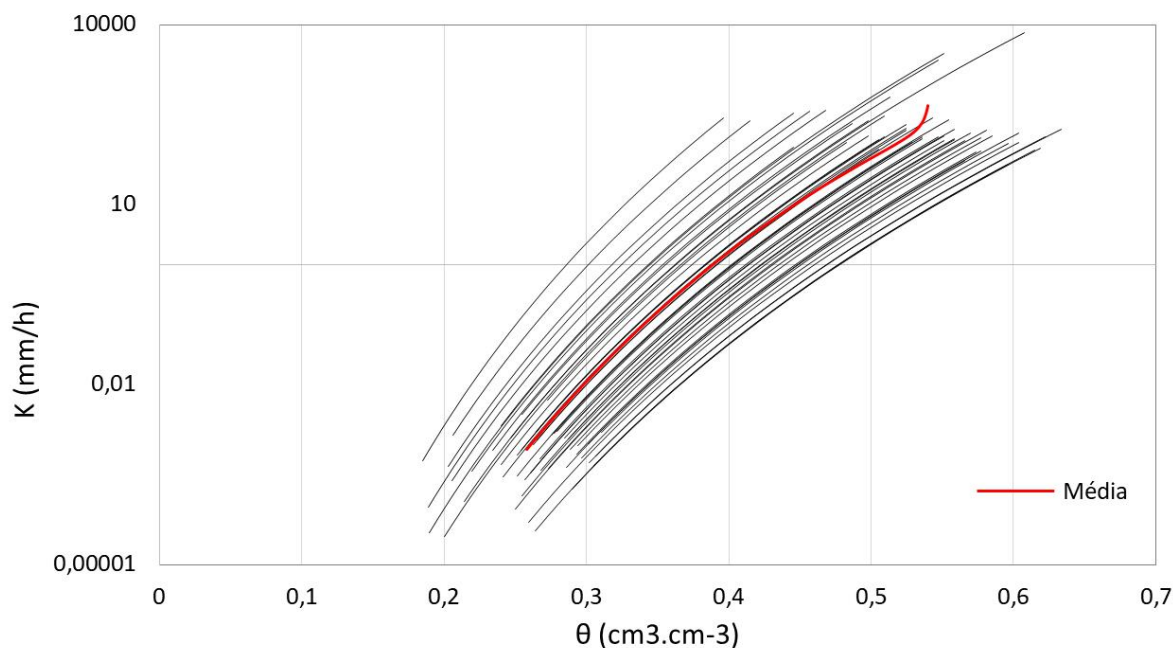


Figura 16 - Curva da condutividade hidráulica estimada para os 48 pontos amostrais.

A condutividade hidráulica não apresentou normalidade ao nível de 5% de probabilidade ao realizar o teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade. Na análise hidrológica do solo, é típico assumir que a condutividade hidráulica possui a característica de log-normal (FREEZE, 1975), como foi encontrado por Pinheiro et al. (2021) e Montenegro & Montenegro (2006). Porém, ao retirar os dados discrepantes da condutividade hidráulica saturada (K_s) os dados apresentam uma distribuição simétrica, o que pode ser observado na Figura 17, onde mostra os gráficos de escala de probabilidade normal da frequência experimental das condutividades hidráulicas saturadas com os dados discrepantes e sem os dados discrepantes, que foram removidos de acordo com os critérios de Hoaglin et al. (1992). Quando os dados discrepantes são removidos, o comportamento normal é observado. Os processos geomorfológicos dos aquíferos aluviais ajudam a explicar essa dispersão (MONTENEGRO & MONTENEGRO, 2006).

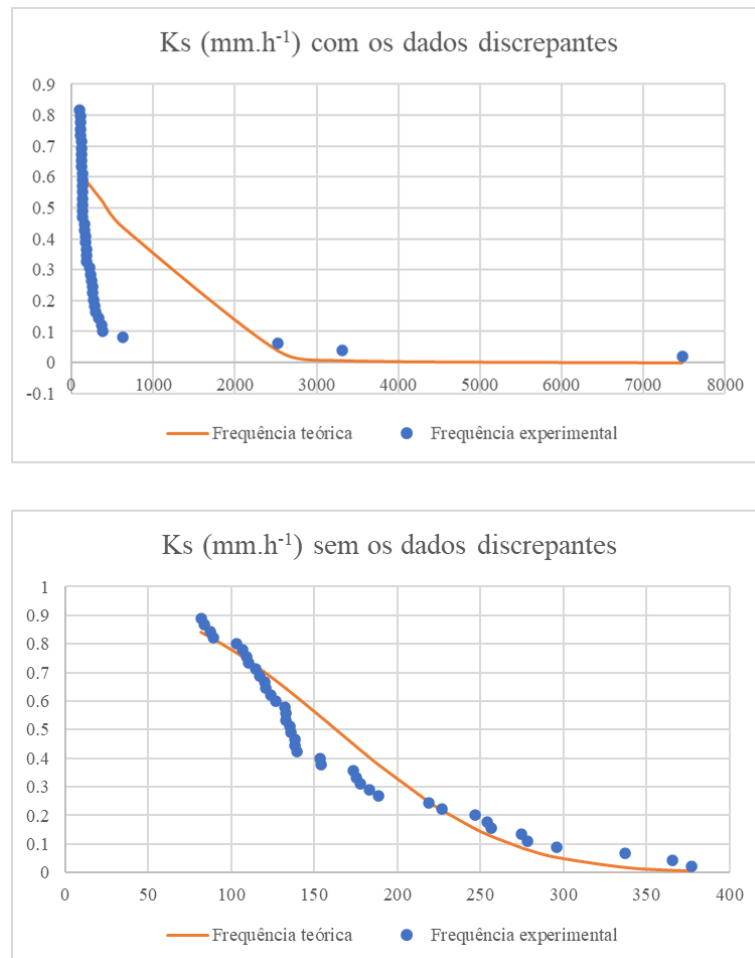


Figura 17 - Gráficos de escala de probabilidade normal da frequência experimental das condutividades hidráulicas saturadas com os dados discrepantes e sem os dados discrepantes.

A normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística, porém condições normais evitam o comprometimento das estimativas da krigagem (LIMA et al., 2015). Yamamoto (2020) explica que muitas vezes os dados não possuem a distribuição normal, porém isso pode ser tratado com uma transformação matemática, a fim de que os dados apresentem a característica que se deseja, tornando suas propriedades conhecidas e matematicamente convenientes.

Na Tabela 5 encontram-se os valores das estatísticas descritivas para os parâmetros observados. Para a umidade volumétrica residual (Θ_r), o programa BEST o estimou em todos os pontos o valor de $0 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$. Os parâmetros n , m e η , são parâmetros de forma que dependem da textura do solo, adimensionais, sendo o mesmo para todos os 48 pontos da malha, o software estimou os seguintes valores, respectivamente, 2,14; 0,07 e 17,27.

Tabela 5 - Estatística descritiva dos parâmetros.

	CC (cm ³ .cm ⁻³)	PMP (cm ³ .cm ⁻³)	Ødisp (cm ³ .cm ⁻³)	Ks (mm.h ⁻¹)	Øsat (cm ³ .cm ⁻³)	Ds (g.cm ⁻³)	S (mm.s ^{-0.5})	Hg (mm)	Ør	n	m	η
Média	0,30	0,17	0,12	439,89	0,54	1,22	1,68	-48,22	0	2,14	0,07	17,27
Mediana	0,30	0,17	0,13	138,14	0,55	1,20	1,60	-45,43	-	-	-	-
Desvio Padrão (DP)	0,04	0,02	0,02	1183,75	0,05	0,14	0,53	26,11	-	-	-	-
Coeficiente de variação (CV%)	12,95	13,05	13,05	269,1	10,10	11,80	31,70	54,14	-	-	-	-
Assimetria	-0,62	-0,57	-0,57	5,09	-0,60	0,59	1,78	-0,71	-	-	-	-
Curtose	-0,30	-0,39	-0,39	28,10	0,13	0,15	5,54	1,16	-	-	-	-

CC: Capacidade de campo; PMP: Ponto de murcha permanente; Ødisp: água disponível; Ks: Condutividade hidráulica; Øsat: umidade volumétrica saturada; Ds: densidade do solo; S: Sorvidade; Hg: valor de escala do potencial matricial; Ør: umidade volumétrica residual; n, m e η : parâmetros de forma.

O estudo do coeficiente de variabilidade (CV%) é importante para comparação de variáveis, pois quando se apresentam abaixo de 12% ocorre uma pequena distribuição dos dados, resultando em uma área com distribuição mais homogênea (LIMA et al. 2015). Picciafuoco et al. (2019) reforçam que não examinar a variabilidade pode produzir erros significativos.

A classificação dos coeficientes de variação, observa-se que obtiveram CV abaixo de 12% em Øs e Ds, sendo classificadas como baixa variabilidade, os demais parâmetros estiveram entre 12% e 62%, assim apresentando média variabilidade. Souza et al. (2017), em estudo também em Parnamirim – PE, também encontraram baixa variabilidade para a Ds (7,03%), e apresentando média variabilidade para Ødisp. Pinheiro et al. (2021) também encontraram média variabilidade para o logKs. O CV% para o Hg (54,14%) se assemelha ao que foi encontrado por França Neto et al. (2021), 55,59%, onde o CV% para esse parâmetro foi estimado para 48 pontos, em uma área de Caatinga.

No presente estudo o Ks apresentou alto valor de CV (269%) indicando alta variabilidade, como a condutividade hidráulica saturada está relacionada à densidade do solo, granulometria e porosidade do solo, Hara et al. (2019) explicam que estudar a condutividade hidráulica saturada pode fornecer critérios técnicos na avaliação da qualidade física do solo que são relevantes para o desenvolvimento da cultura, justificando o alto valor de CV para a Ks a interação dessa variável com as características estruturais e texturais do solo.

Santos et al. (2012) também encontraram valor alto de CV para Ks. Segundo Souza et al. (2017), a flutuação significativa de Ks tem sido associada a uma variedade de fatores que podem afetar a qualidade do solo. Os valores de CV podem atingir mais de 1000%, dependendo da natureza da qualidade do solo.

Verificou-se tendência linear para todos os parâmetros com coeficiente de determinação (R^2) superior a 70%, com exceção da CC (68%), PMP (68%), Θ_{disp} (68%), sendo necessária uma transformação dos dados de ajuste polinomial e seus semivariogramas construídos com os resíduos.

Os semivariogramas foram confeccionados pelo software GS+ (Figura 18) e seus parâmetros e modelos validados através da validação cruzada de Jack Knifing pelo software GEO-EAS. Todos os semivariogramas apresentaram efeito pepita puro, mesmo com a retirada dos dados discrepantes e a confecção dos semivariogramas sendo realizadas com resíduos do ajuste polinomial (Tabela 6). A existência de efeito pepita configura um fenômeno espacial com descontinuidade na origem, o que ocasiona um grau de dependência espacial fraco.

Tabela 6 - Parâmetros dos semivariogramas.

Modelo		C0
CC	Efeito Pepita Puro	0,001354
PMP	Efeito Pepita Puro	0,000429
Θ_{disp}	Efeito Pepita Puro	0,000249
Θ_{sat}	Efeito Pepita Puro	0,00195
S	Efeito Pepita Puro	0,116200
Ks	Efeito Pepita Puro	4806.007
Hg	Efeito Pepita Puro	502,513039
Ds	Efeito Pepita Puro	0,013246

CC: capacidade de campo; PMP: Ponto de murcha permanente; Θ_{disp} : umidade disponível Θ_{sat} : umidade volumétrica saturada; S: sorvidade; Hg: valor de escala do potencial matricial; Ks: Condutividade hidráulica saturada; Ds: densidade do solo; C0: Efeito pepita.

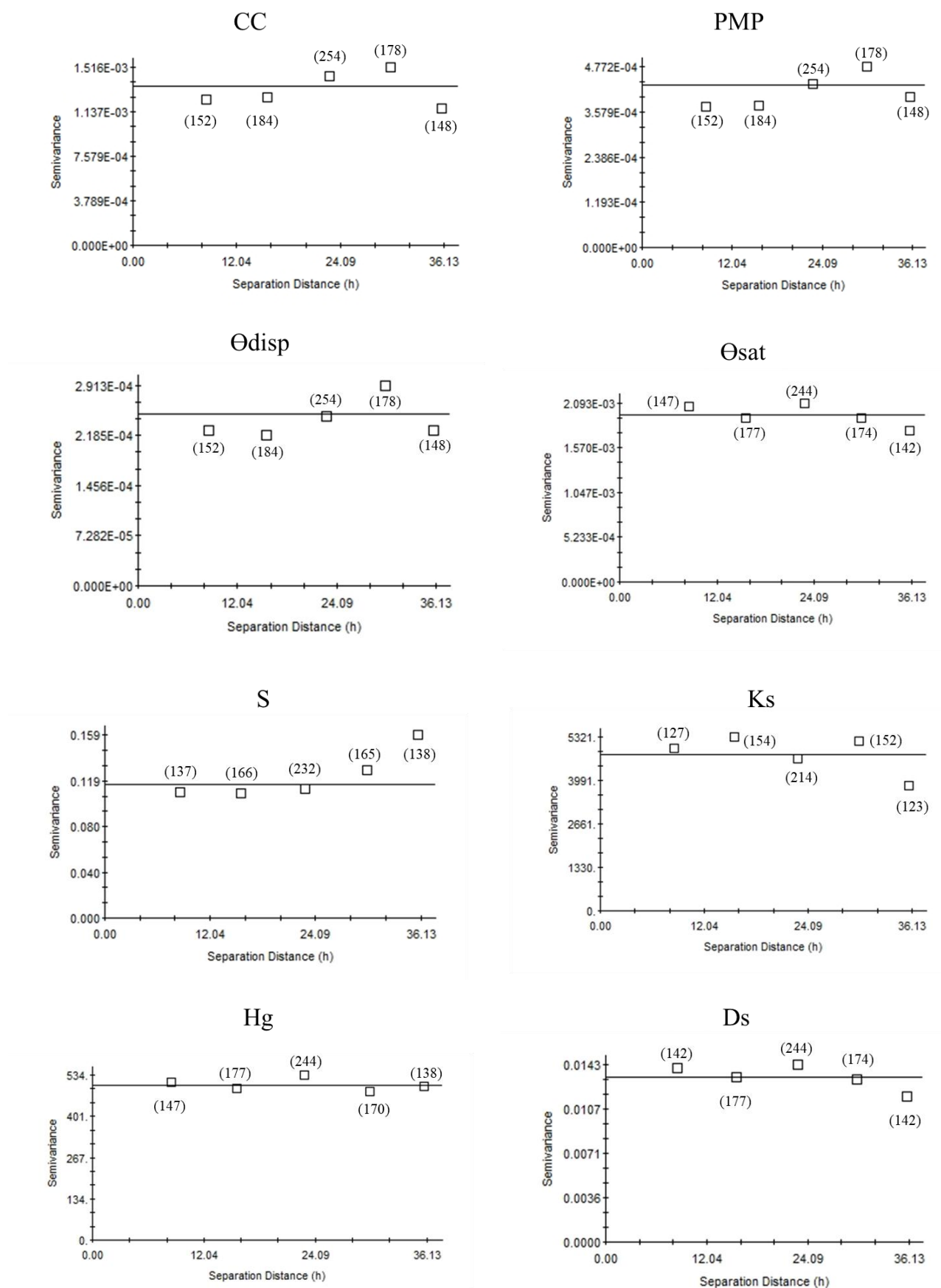


Figura 18 – Semivariogramas e seus respectivos pares das variáveis do Beerkan.

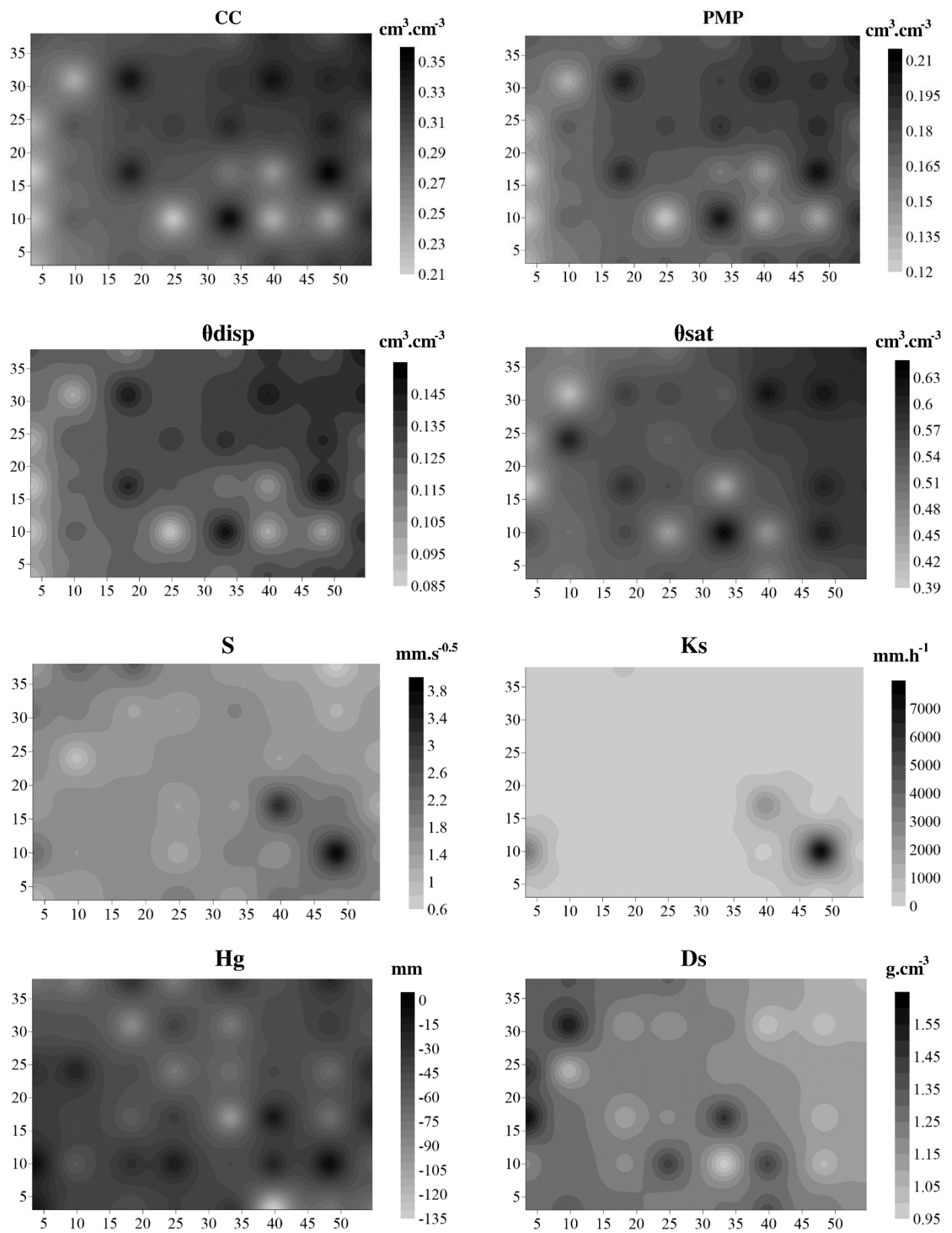


Figura 19 - Mapeamento dos parâmetros hidrodinâmicos do solo

Ao mapear os parâmetros hidrodinâmicos do solo (Figura 19), utilizando o inverso da potência da distância, observa-se que a K_s apresentou valores mais uniformes em toda área, contudo no lado esquerdo inferior apresentou uma elevada variabilidade, provavelmente ocasionada pelos dados discrepantes. Áreas com K_s mais elevada apresentam uma maior taxa de infiltração, portando uma redução mais rápida da umidade na camada superficial (KUNZ et al., 2014). A geoestatística foi utilizada para obter uma visão da área experimental, auxiliando na tomada de decisões para o manejo eficiente da agricultura de precisão, como o melhor manejo na irrigação com água de reúso que virá a ser utilizada na área experimental. Porém no contexto deste estudo, serve de caracterização inicial para futuras pesquisas na área de irrigação com água de reúso.

4 CONCLUSÕES

O Método do Beerkan se mostrou eficiente para a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do solo e para a construção das curvas de retenção de água no solo e condutividade hidráulica.

A condutividade hidráulica apresentou não normalidade dos dados, alta variabilidade e tendência, seu semivariograma foi de efeito pepita puro.

O uso da geoestatística possibilitou constatar a ausência de dependência espacial para a condutividade hidráulica da área de estudo.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, T. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; RODRIGUES, D. F. B. Variabilidade espaço-temporal da condutividade elétrica da água subterrânea na região semiárida de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, (16), p. 496–504, 2012.
- ANGULO-JARAMILLO, R.; BAGARELLO, V.; DI PRIMA, S.; GOSSET, A.; IOVINO, M.; LASSABATERE, L. Beerkan estimation of soil transfer parameters (BEST) across soils and scales. *Journal of Hydrology*, v. 576, p. 239-261, 2019.
- AYANGBENRO, A. S.; BABALOLA, O. O. Reclamation of arid and semi-arid soils: The role of plant growth-promoting archaea and bacteria. **Current Plant Biology**, v. 10, n. 2, p. 100 – 107, 2020.
- BRANDÃO, V. S.; CECÍLIOMR. A.; PRUSKI, F. F.; da SILVA, D. D. Infiltração da água no solo. 3 ed. Viçosa: Editora UFV, 2006.

BROOKS, R. H. & COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper, n.3, Fort Collins: Colorado State University, 27p, 1964.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. K.; NOVAK, J. M.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, 58, pp. 1501–1511, 1994.

DI PIAZZA, A.; CONTI, F.L.; NOTO, L.V.; VIOLA, F.; LA LOGGIA, G. Comparative analysis of different techniques for spatial interpolation of rainfall data to create a serially complete monthly time series of precipitation for Sicily, Italy. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.13, p. 396 – 408, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solos. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 574 p, 2017.

FRANÇA NETO, J. M.; COUTINHO, A. P.; Di PRIMA, S.; BEZERRA, S. T. M.; SANTOS NETO, S. M.; RABELO, A. E. C. G. C.; DE OLIVEIRA, A. L.; ANTONINO, A. C. D. Variability and spatial distribution of hydrodynamic properties in soil with preserved Caatinga. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 26, e. 20, 2021.

FREEZE, R. A. A stochastic conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media. **Water Resources Research**, Washington, v.11, n.5, p.725-742, 1975.

Golden Software, 2010. Surfer for windows version 9.0.

GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; VIANA, J. deD. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 23, n. 5, p. 1149-1157, 2001.

HARA, A. T.; GONÇALVES, A. C. A.; MALLER, A.; OLIVEIRA, J. M.; REZENDE, R. Produtividade do feijoeiro e a relação com a condutividade hidráulica saturada. **Revista Engenharia na Agricultura**, v.27, n.5, p. 462-471, 2019.

HOAGLIN, D. C.; MOSTELLER, F.; TUKEY, J. W. Análise exploratória de dados: Técnicas robustas. Lisboa: Edições Salamandra. 1992. 446p.

JOURNEL, A. G. **Fundamentals of geostatistics in five lessons**. Washington: American Geophysical Union, 1989. 40p.

KUNZ, J.; ÁVILA, V. S.; PETRY, M. Distribuição temporal e espacial da umidade do solo em sistemas de irrigação por gotejamento subsuperficial. **Revista Monografias Ambientais**, v.13, p.3963- 3976, 2014.

LANDIM, P. M. B. GEOEAS: um exemplo de aplicação em análise geoestatística. São Paulo: Editora da UNESP. 2003. 41p.

LASSABATÈRE, L.; ÂNGULO-JARAMILLO, R.; SORIA UGALDE, J. M.; CUENCA, R.; BRAUD, I. HAVERKAMP, R. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments. **Soil Science Society of America Journal**, 70 (2), p. 521 -532, 2006.

LEMOS FILHO, L. C. A.; FERREIRA, L. L. N.; LYRA, D. L. Variabilidade espacial de atributos do solo indicadores de degradação ambiental em microbacia hidrográfica. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 11, n. 1, p. 11-20, janeiro-março, 2017.

LIMA, F. V.; SILVINO, G. S.; MELO, R. S. S. M.; LIRA, E. C.; RIBEIRO, T. S. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em área de encosta sob processo de degradação. **Revista Caatinga**, 28 (4), pp. 53-63, 2015.

LINS, F. A. C.; LOPES, I.; MONTENEGRO, A. A. A. Variabilidade espacial da umidade e condutividade elétrica do solo em vale aluvial utilizando técnicas geofísicas. **Revista de Geociências do Nordeste**, v.6, n.1, p. 56-63, 2020.

LOPES, I. & MONTENEGRO, A. A. A. Spatialization of electrical conductivity and physical hydraulic parameters of soils under different uses in na aluvial valley. **Revista Caatinga**, v. 32, n 1, p. 222-233, 2019.

MACÊDO, G.; SOARES, W. Utilização de métodos de campo e laboratoriais para estimação de propriedades hidrodinâmicas do solo. **Revista Águas Subterrâneas**,v. 34, n. 2, p. 166-176, 2020.

MENEGAZ, S. T.; NUNES, J. N. V.; PETRY, M. T.; BASSO, L. J.; HENCKES, J. R.; GOMES, H. Avaliação da qualidade físico-hídrica de solos irrigados em algumas regiões do Brasil. **III INOVAGRI International Meeting**, p. 536- 546, 2015.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 30-37, 2006.

PICCIAFUOCO, T.; MORDIDELLI, R.; FLAMMINI, A.; SALTALIPPI, C.; CORRADINI, C.; STRAUSS, P.; BLÖSCHL, G. On the estimation of spatially representative plot scale saturated hydraulic conductivity in an agricultural setting. **Journal of Hydrology**, 570, 106-117, 2019.

PINHEIRO, A. G., JARDIM, A. M. R. F., MONTENEGRO, A. A. A., SILVA, T. G. F., SILVA, J. R. I.; Characterization of alluvial soil hydrodynamics in the Upper Ipanema River Basin using the Beerkan Method,. **DYNA**, 88(218), p. 178-184, 2021.

ROBERTSON, G.P. GS+: Geostatistics for the Environmental Sciences; Gamma Design Software: Plainwell, MI, USA, 2008.

SALTER, P.J. & WILLIAMS, J.B. The influence of texture on the moisture characteristics of soils. II. Available water capacity and moisture release characteristics. *J. Soil. Sci.*, 16:310-317, 1965.

SANTOS, K. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; ALMEIDA, B. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANDRADE, T. S.; FONTES JÚNIOR, R. V. P. Variabilidade espacial de atributos físicos

em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 16, n. 8, p. 828-835, 2012.

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

SOUZA, R.; SOUZA, E.; NETTO, A. M.; ALMEIDA, A. Q.; BARROS JÚNIOR, G. B.; INÁCIO SILVA, J. R.; LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D. Assessment of the physical quality of a Fluvisol in the Brazilian semiarid region. **Geoderma Regional**, v.10, p. 175-182, 2017.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, v.44, p.892-898, 1980.

VAUCLIN, M.; VIEIRA, S. R.; VACHAUD, G.; NIELSON, D. R. The Use of Cokriging with Limited Field Soil Observations1. **Soil Science Society of America Journal**, 47 (2), pp. 175–184, 1983.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, 51, pp. 1–75, 1983.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field In: Hillel, D. Applications of soil physics. New York: Academic, p. 319-344, 1980.

YAMAMOTO, J. K. Estatística, análise e interpolação de dados geoespaciais. 1 ed, São Paulo: Gráfica Paulos, 2020.

CAPÍTULO III: VARIABILIDADE ESPACIAL DA SALINIDADE E ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO EM UMA REGIÃO SEMIÁRIDA DO NORDESTE BRASILEIRO SOB CULTIVO DE PALMA FORRAGEIRA.

FONSECA, A. C. N. Variabilidade espacial da salinidade e estoque de carbono do solo em uma região semiárida do Nordeste Brasileiro sob cultivo de palma forrageira. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2022.

Resumo

Solos com maiores teores de sais impactam processos naturais, dentre eles, a mineralização de carbono. O mapeamento do estoque de carbono orgânico (ECO) e da salinidade do solo permite estudar o manejo adequado do solo para minimizar as reduções e ineficiências na produtividade das culturas. Nesse contexto, o objetivo foi observar a variabilidade espacial da salinidade e do estoque de carbono orgânico do solo em uma área experimental aluvial no semiárido pernambucano localizada na Fazenda Primavera (FP) e em uma mata ciliar (MC). Foram adotadas duas malhas para amostragem da condutividade elétrica (CE) do solo ECO do solo. A FP possui dimensões de 41 x 58 m, totalizando 48 pontos. A área da MC próxima ao rio Brígida possui dimensões de 15x15 m, totalizando 36 pontos amostrais, essa área fica sendo utilizada nesse capítulo como testemunha. As variáveis de CE e ECO foram submetidas a análise pela estatística descritiva, teste de normalidade e técnicas geoestatísticas para verificação de dependência espacial. O grau de dependência espacial (GDE) para a CE foi classificado como fraco, exceto a camada 0,20-0,40 da MC, para a qual o semivariograma ajustado foi o exponencial, com alcance de 9,09 m e o GDE foi de 36,72%, sendo classificado como GDE moderada. Em ambas as áreas, os semivariogramas para ECO apresentaram efeito pepita puro em todas as camadas. Em relação às variáveis ECO e a CE, como possíveis indicadores de qualidade do solo, fica evidente com esse estudo, que a mata ciliar apresentou melhor qualidade de solo, por apresentar baixa CE e alto teor de ECO, comparando-se a FP. Conclui-se que esse capítulo servirá como um estudo básico sobre a variabilidade espacial dessas variáveis, para que se empregue técnicas conservacionistas com precisão adequada.

Palavras-chave: Produtividade; Manejo conservacionista; Qualidade do solo; Geoestatística.

FONSECA, A. C. N. Spatial variability of salinity and soil carbon stock in a semi-arid region of northeastern Brazil under forage cactus cultivation. Dissertation (Master's in Agricultural Engineering) – Federal Rural University of Pernambuco, 2022.

Abstract

Soils with higher salt contents impact natural processes, including carbon mineralization. The mapping of the stock of organic carbon (ECO) and the salinity of the soil allows studying the adequate management of the soil to minimize the reductions and inefficiencies in the productivity of the cultures. In this context, the objective was to observe the spatial variability of salinity and soil organic carbon stock in an alluvial experimental area in the semi-arid region of Pernambuco located at Fazenda Primavera (FP) and in a riparian forest (MC). Two grids were adopted for sampling the electrical conductivity (EC) of the soil ECO soil. The FP has dimensions of 41 x 58 m, totaling 48 points. The MC area near the Brígida river has dimensions of 15x15 m, totaling 36 sampling points, this area is being used in this chapter as a witness. The EC and ECO variables were submitted to analysis by descriptive statistics, normality test and geostatistical techniques to verify spatial dependence. The degree of spatial dependence (GDE) for the CE was classified as weak, except for the 0.20-0.40 layer of the MC, for which the adjusted semivariogram was exponential, with a range of 9.09 m and the GDE was 36.72%, being classified as GDE moderate. In both areas, the semivariograms for ECO showed a pure nugget effect in all layers. Regarding the variables ECO and EC, as possible indicators of soil quality, it is evident from this study that the riparian forest presented better soil quality, as it has low EC and high ECO content, compared to FP. It is concluded that this chapter will serve as a basic study on the spatio variability of these variables, so that conservation techniques can be used with adequate precision.

Keywords: Productivity; Conservation management; Soil quality; Geostatistics.

1 INTRODUÇÃO

A salinização do solo é um problema global, que ameaça a produtividade e a sustentabilidade agrícola e que constitui uma das causas mais relevantes da degradação ambiental (XU et al., 2019; SAFDAR et al., 2019; JUSTO et al., 2021). O problema é ainda mais evidente em regiões áridas e semiáridas devido à baixa precipitação e a alta taxa de evapotranspiração (SHANKAR & EVELIN, 2019; CASTRO & SANTOS, 2020).

Duarte et al. (2015) definem a salinização do solo como o aumento da concentração de sais na solução do solo, sendo um processo majoritariamente causado por influência antrópica, como a irrigação e a ineficiência de drenagem. Segundo Silva Júnior et al. (2009), solos com maiores teores de sais impactam diretamente nas funções de plantas e microorganismos e, portanto, a salinização tem reflexo em processos naturais, dentre eles, a mineralização de carbono.

O Carbono representa aproximadamente 58% da Matéria Orgânica do Solo (NANZER et al., 2019). Os solos da região semiárida sofrem perda do carbono orgânico, resultando em uma menor produtividade. Porém, um adequado manejo desse solo possui um potencial para o sequestro de carbono (TONDOH et al., 2016). Estudos sobre a eficiência do sequestro de carbono orgânico nos solos como medida para mitigação das mudanças climáticas vêm ganhando destaque (GONÇALVES et al., 2019; FERREIRA et al., 2018; JESUS et al., 2019; ZHOU et al. 2019; TONDOH et al., 2016).

O estoque de carbono orgânico nos solos é um forte indicador de qualidade do solo (SÁ et al., 2018), desse modo, Boubehziz et al (2020) em seu estudo destacaram que os teores elevados de ECO ocorreram em áreas com vegetação mais densa, e apresentaram valores baixos em áreas onde existe a degradação do solo. Fidalgo et al. (2007) lembram que a estocagem de Carbono Orgânico em solo depende diretamente de qualidade e quantidade da matéria orgânica presente no solo e bem como pelas práticas ao qual este é submetido. Em sistemas integrados, o estoque de carbono tende a aumentar de forma gradual até atingir o nível de equilíbrio no solo (ASSAD et al. 2019).

Para buscar estratégias para a sustentabilidade agrícola de áreas com potenciais riscos de salinização, o conhecimento da distribuição espacial dos elementos que governam esses processos permite ao produtor melhorar o manejo do solo através da definição de zonas de manejo (RODRIGUES et al., 2018; MINHAS et al., 2020). Concomitante a isso, o mapeamento do ECO também propicia um estudo do manejo adequado de solo, com o

propósito de evitar degradação e aumento da eficiência no rendimento das culturas (VERONESI & SCHILLACI, 2019).

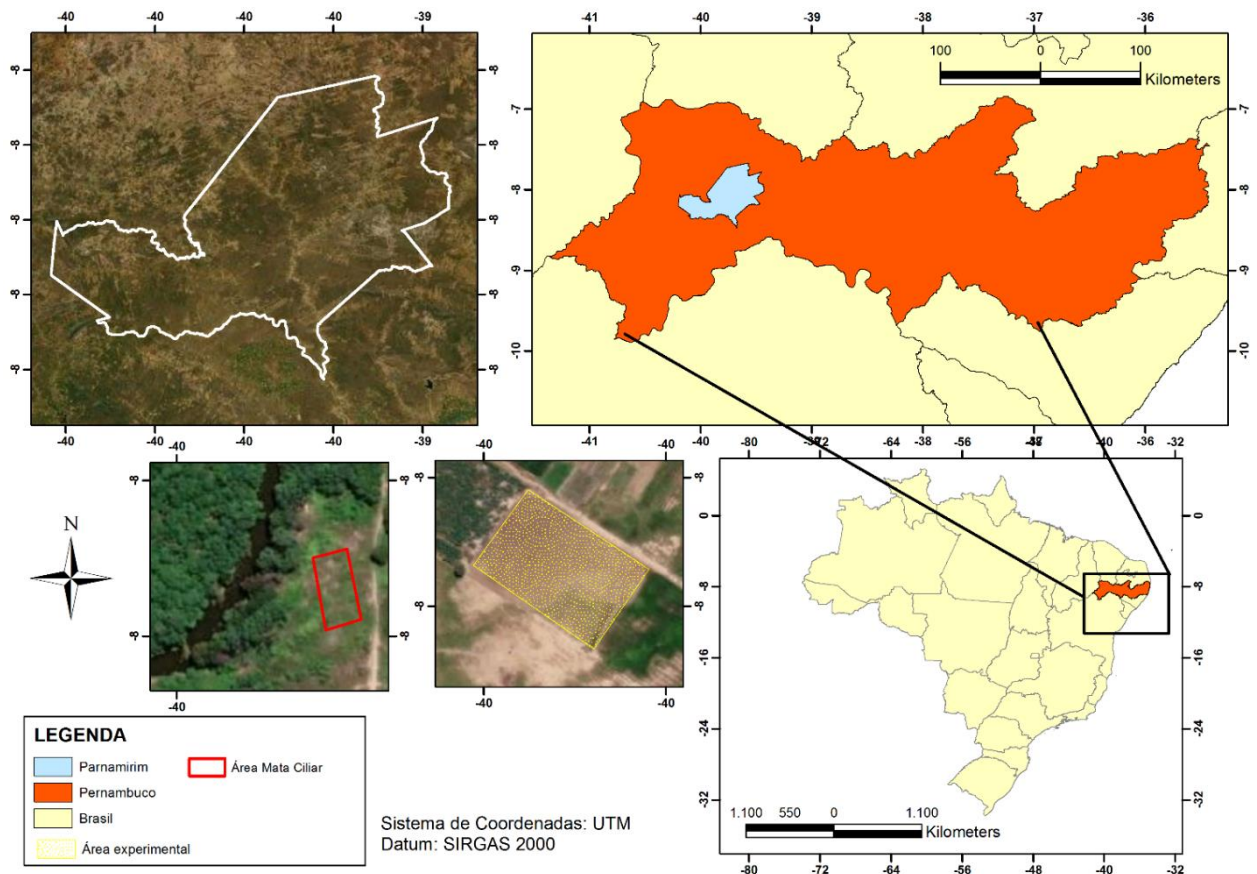
Nesse sentido, pesquisas têm utilizado a geoestatística como uma ferramenta para construção de mapas de variabilidade espacial (NIÑEROLA et al., 2017; DINH et al., 2018). A ferramenta da geoestatística serve como auxílio para uma estimativa mais abrangente dessa variável, auxiliando em uma melhor uniformização na análise de dados (MARINHO JUNIOR et al., 2020)

O objetivo do presente capítulo foi verificar a variabilidade espacial da salinidade e do estoque de carbono orgânico do solo em uma região semiárida pernambucana, desse modo avaliar a dinâmica e dependência espacial em uma área com cultivo de palma forrageira irrigada com água de reuso e outra correspondente a mata ciliar do vale rio Brígida, avaliando a condição do solo para futuros estudos com manejo conservacionista.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

O estudo foi realizado em junho de 2021, em área aluvial inserida em região semiárida. As áreas de estudo estão localizadas no município de Parnamirim-PE, a primeira área experimental se encontra na Fazenda Primavera (FP) e a outra no Campus Avançado de Agricultura Irrigada de Parnamirim (EAIP) da Universidade Federal Rural de Pernambuco, inserido na bacia hidrográfica do Rio Brígida (Figura 20).



Fonte: Autor, 2022.

Figura 20 - Localização da área experimental Mata Ciliar (MC) e Fazenda Primavera (FP).

2.2 Amostragem de solo

Foram adotadas duas malhas para amostragem da condutividade elétrica (CE) do solo e carbono orgânico (CO) do solo. A área da Fazenda Primavera (FP) possui dimensões de 41 x 58 m, totalizando 48 pontos (Figura 8). Para amostragem da CE nessa área levou em consideração três profundidades, gerando as seguintes camadas: 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. Para o CO foram consideradas quatro camadas, 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m.

Na área da MC, possuiu dimensões de 15x15 m, totalizando 36 pontos amostrais (Figura 21), essa área fica próxima ao rio Brígida, sendo utilizada nesse capítulo como testemunha, por ser uma mata ciliar (MC) composta principalmente por algaroba (*Prosopis juliflora*). Em ambas as variáveis estudadas foram coletadas amostras em duas camadas: 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m. Nas localidades experimentais foram realizadas coletas de solo deformadas, com o objetivo de determinar a classe textural do solo.

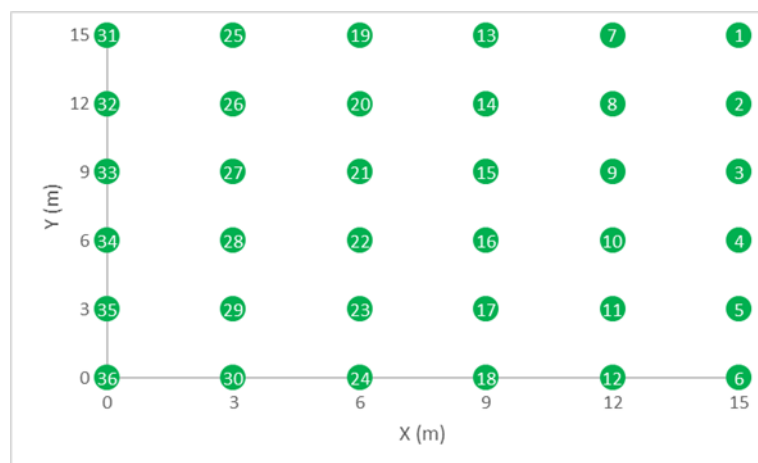


Figura 21 - Malha da área experimental pertencente a MC e os pontos amostrais.

2.3 Análises em laboratório

As análises em laboratório foram realizadas na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), no Laboratório de Água e Solo (LAS), pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEAGRI), no bairro de Dois Irmãos, Recife – Pernambuco.

Com o intuito de determinar a textura do solo (Figura 22) nas duas áreas aplicou-se a metodologia do densímetro de Boyoucus, seguindo a Embrapa (2011), com objetivo a verificar o teor das frações de areia, argila e silte e assim aplicar o triângulo textural (Figura 9).



Figura 22 - Determinação da textura pelo método do densímetro de Boyoucus.

A salinidade do solo foi estimada pela condutividade elétrica pelo método da pasta saturada do solo (RICHARDS, 1954). Essa metodologia consiste em determinar os sais solúveis nos solos, medindo-se cátions e ânions no extrato aquoso (EMBRAPA, 2011) (Figura 23).



Figura 23 - Determinação da condutividade elétrica pelo método da pasta saturada do solo.

Após a determinação da condutividade elétrica do solo, utilizou-se a classificação Sistema. Brasileiro de Classificação de Solos (2018) (Tabela 7):

Tabela 7 - Classificação da salinidade do solo de acordo Sistema. Brasileiro de Classificação de Solos (2018).

Classificação	Variação da condutividade elétrica	Consequência
Caráter sálico	Condutividade elétrica no extrato de saturação igual ou maior que 7 dS m ⁻¹ (a 25 °C).	Quantidade tóxica à maioria das culturas.
Caráter salino	Condutividade elétrica do extrato de saturação igual ou maior que 4 dS m ⁻¹ e menor que 7 dS m ⁻¹ (a 25 °C).	Quantidade que interfere no desenvolvimento da maioria das culturas.

Fonte: Adaptado do Sistema. Brasileiro de Classificação de Solos (2018).

As amostras foram secas ao ar, trituradas e passada por uma peneira de malha com 2 mm, com o intuito de remover cascalhos e raízes. O total do carbono orgânico no solo foi determinado pela oxidação do carbono orgânico com Dicromato de Potássio em meio ácido, com auxílio de uma fonte de calor externa, seguido de titulação com Sulfato Ferroso Amoniacal 0,2 mol.L⁻¹ (YEOMANS & BREMNER, 1988) (Figura 24).



Figura 24 - Determinação do total de carbono orgânico no solo.

Para determinação do estoque de carbono orgânico no solo (ECO), foi utilizada a expressão (Equação 8) (NANZER et al., 2019):

$$ECO = (TCO \times Ds \times e) \div 10 \quad \text{Equação 8}$$

No qual:

ECO = Estoque do carbono orgânico em Mg. ha⁻¹;

TCO = Teor de carbono em g.kg⁻¹;

Ds = Densidade do solo em kg.dm⁻³;

e = Espessura da cama de solo considerada em cm.

2.4 Análise estatística

As variáveis de CE e ECO foram submetidas a análise pela estatística descritiva, determinando a sua média, mediana, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV). A

partir disso, os coeficientes de variação foram analisados de acordo com a classificação de Warrick & Nielsen (1998), no qual classifica baixa variabilidade quando o CV é menor do que 12%, variabilidade moderada quando o CV se encontra entre 12% e 60% e alta variabilidade quando o CV é maior do que 60%.

A dispersão e a distribuição dos dados foram avaliadas pelo teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov (KS) ao nível de 5% de probabilidade. Os dados discrepantes foram retirados, seguindo o critério de Hoaglin et al. (1992) para limite superior (Ls) e inferior (Li) (Equações 6a, 6b), e caso os dados não apresentassem normalidade foram submetidos a transformação logarítmica para a etapa da geoestatística.

2.6 Análise Geoestatística

Utilizando-se as técnicas geoestatísticas verificou-se a dependência espacial da CE e do ECO, a partir de ajustes da função clássica para os semivariogramas, conforme Vieira et al. (1981). Os semivariogramas e seus ajustes foram testados para os modelos gaussiano, esférico e exponencial.

Confirmada a existência de tendência, utilizou-se um ajuste polinomial para os valores das propriedades em função das coordenadas e derivando o resíduo pela diferença entre o valor medido e o estimado pelo polinômio, em cada ponto, a tendência foi eliminada. Desse modo, os resíduos passam a ser as variáveis regionalizadas, possuindo localmente as médias no valor de zero, sendo possível ajustar o semivariograma com os resíduos (LANDIM, 2003).

Foi realizada a validação cruzada de Jack Knifing a partir dos parâmetros definidos, efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1), alcance (A) (VAUCLIN et al. 1983), desta maneira escolhe o modelo que apresentou melhor qualidade de ajuste: erros com média próxima a zero e desvios padrão próximo a unidade (MONTENEGRO & MONTENEGRO, 2006).

A classificação do grau de dependência espacial (GDE) seguiu o que foi proposto por Cambardella et al. (1994), relacionando o efeito pepita (C_0) com o patamar (C_0+C_1), da forma que o grau de dependência é forte quando for menor do que 25%, grau de dependência moderada quando se encontra entre 25% e 75% e fraco grau de dependência espacial quando for maior ou igual que 75%. Os mapas de isolinhas foram gerados a partir do algoritmo da interpolação da krigagem, com o objetivo de observar a distribuição espacial das variáveis, quando ocorreu dependência espacial.

3 RESULTADOS

As texturas nos solos das duas áreas foram determinadas, de acordo com o triângulo textural a área da Fazenda Primavera possui um solo franco argilo siltoso. A área com mata ciliar apresenta valores de silte e areia maiores do que a da Fazenda Primavera, sendo classificado no triângulo textural como franco siltoso (Tabela 8).

Tabela 8 – Média, desvio padrão e classificação textural das áreas da Fazenda Primavera e Mata Ciliar.

Área de estudo	Granulometria do solo (g.kg ⁻¹)				Triângulo Textural
		Areia	Argila	Silte	
Fazenda Primavera	Média	7,92	293,95	698,13	Franco argilo siltoso
	D.P	1,38	57,66	57,66	
Mata Ciliar (MC)	Média	20,67	241,48	737,85	Franco Siltoso
	D.P	4,51	33,68	29,98	

D.P: Desvio Padrão

Ao produzir os box-plots da CE e ECO, através da estatística descritiva (Tabelas 9 e 10), observou-se a presença de outliers (Figura 25), que podem afetar as avaliações. Tais outliers foram removidos de acordo com os critérios de Ls e Li (Equação 6a, 6b). Segundo Capela & Capela (2012), esse tipo de gráfico permite avaliar a simetria dos dados, sua dispersão e a existência ou não de outliers (valores discrepantes), sendo utilizado especialmente com o intuito de comparar dois ou mais conjuntos de dados correspondentes às categorias de uma variável.

Nota-se no box-plot da CE (Figura 25) que os valores referentes a área da Fazenda Primavera são superiores aos da mata ciliar as medidas de condutividade elétrica revelaram que o solo apresentava excesso de sais solúveis, com valores acima de 4,1 dS m⁻¹, essa situação é explicada pelo fato da irrigação e aplicação de fertilizantes que foram utilizadas anteriormente para o cultivo de milho, de acordo com Souza et al. (2007), devido ao seu impacto direto no potencial osmótico, os sais presentes no solo quando em excesso podem prejudicar o crescimento das plantas. Esta é uma característica típica dos solos semiáridos devido às chuvas erráticas e infrequentes, drenagem deficiente e altas taxas de evaporação, o que favorece o acúmulo de sais nos solos locais (PEDROTTI et al., 2015).

No caso do presente estudo, a área com cultivo de palma forrageira apresentou maiores valores de CE na camada amostrada mais profunda, que vai de 0,20-0,40 m. Souza et al. (2007), explica que durante a estação seca, o rebaixamento do lençol freático permite que

os sais no perfil sejam transportados para grandes profundidades quando ocorre as primeiras lavagens.

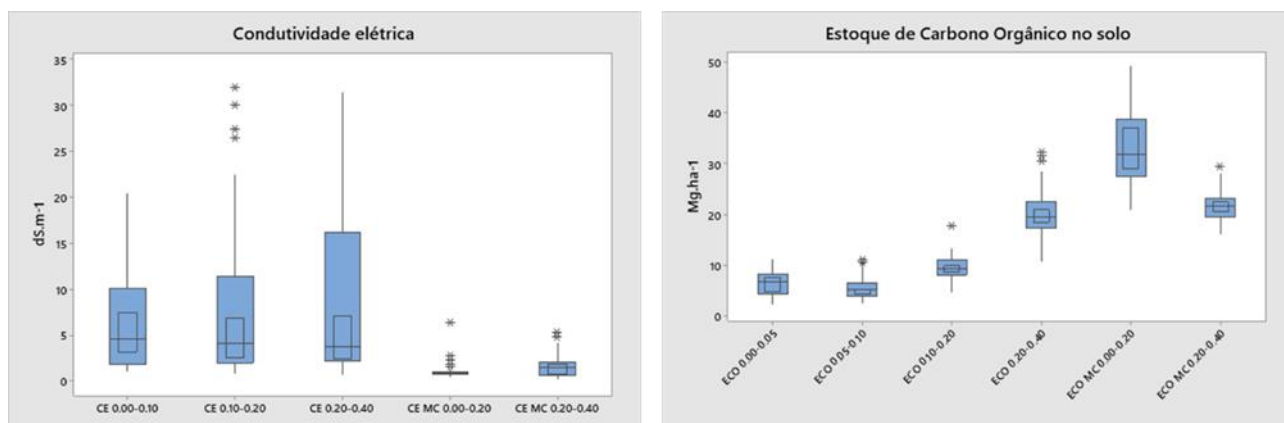


Figura 25 - Box plot da condutividade elétrica (CE) e estoque de carbono orgânico no solo (ECO) com presença de outliers.

A camada 0,00 -0,20 m da MC, em relação ao ECO, apresenta valores superiores. Sá et al. (2018) relataram a importância de amostragem para essa variável em camadas mais profundas, visto que na camada superficial 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m apresentaram valores maiores do ECO, em uma floresta com menos de 20 anos de regeneração.

Tabela 9 - Estatística descritiva dos dados amostrados para condutividade elétrica (CE)

	Média dS.m⁻¹	Mediana dS.m⁻¹	Desvio Padrão	C.V(%)	K.S
CE 0,00-0,10	6,55	4,60	5,15	79	ND
CE 0,10-0,20	8,21	4,11	8,78	107	NND
CE 0,20-0,40	8,43	3,73	8,95	106	NND
CE MC 0,00-0,20	1,15	0,88	1,00	87	NND
CE MC 0,20-0,40	1,66	1,49	1,30	78	ND

CE: Condutividade elétrica; MC: Mata ciliar; C.V: Coeficiente de variação; K.S: Teste de Kolmogorov-Smirnov; ND: Normalidade dos dados; NND: Não normalidade dos dados.

Tabela 10 - Estatística descritiva dos dados amostrados para estoque de carbono orgânico no solo (ECO).

	Média	Mediana	Desvio Padrão	C.V(%)	K.S
ECO 0,00-0,05	6,37	6,73	2,38	37	ND
ECO 0,05-0,10	5,42	5,13	2,33	43	ND
ECO 0,10-0,20	9,61	9,33	2,19	23	ND
ECO 0,20-0,40	20,25	19,60	5,01	25	ND
ECO MC 0,00-0,20	33,27	31,79	7,02	21	ND
ECO MC 0,20-0,40	21,78	21,69	2,98	14	ND

ECO: Estoque de carbono orgânico no solo; MC: Mata ciliar; CV: Coeficiente de variação; K.S: Kolmogorov-Smirnov; ND: Normalidade dos dados; NND: Não normalidade dos dados.

Para a condutividade elétrica (CE), na Fazenda Primavera, os dados da camada superficial 0,00-0,10 m apresentaram normalidade por Kolmogorov-Smirnov a 5% de significância. Para a 0,10-0,20 m não apresentou normalidade dos dados, porém ao retirar os dados discrepantes observados no box-plot, os dados apresentaram normalidade. Em contrapartida, a camada 0,20-0,40 m não apresentou normalidade dos dados e não ocorreu outliers. Nesse caso se fez necessário uma transformação logarítmica dos dados, que com isso apresentaram a normalidade.

Em relação à normalidade dos dados para a área referente a mata ciliar, os dados apresentaram normalidade na camada mais profunda de 0,20-0,40 m. Já para a camada superficial ao retirar os outliers, os dados apresentaram normalidade a 5% de significância. Os coeficientes de variação (CV%), para as camadas amostradas nas duas áreas apresentaram alta variabilidade dos dados para CE. Andrade et al. (2012) explicam que o local com maior concentração iônica geralmente ocorre onde a textura do solo é mais fina, minimizando a lavagem de sal, e esses dois fatores interagem para afetar a condutividade elétrica.

Observando a média da CE nas três camadas amostradas da Fazenda Primavera, pode-se classificar segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (2018), a primeira camada apresenta média superior a 4dS.m^{-1} e inferior a 7dS.m^{-1} , sendo classificado como caráter salino. A segunda e a terceira camada apresentam CE superior a 7dS.m^{-1} , obtendo-se a classificação de caráter sálico.

Provavelmente o manejo anterior (irrigação + adubação) contribuiu para o aumento da salinidade do solo, visto que todas as camadas apresentaram CE acima de 4dS.m^{-1} na FP, observa-se também na Tabela 9 maiores concentrações de CE nas camadas mais profundas, Silva et al. (2008) constataram que isso ocorreu em seu estudo como consequência dos

regimes hidrológicos, devido a lixiviação de sais das camadas superiores e posterior acúmulo nas camadas inferiores e Tedeschi & Dell'Aquila (2005) correlacionaram a quantidade de NaCl aplicada com a irrigação a esse comportamento de acumulação de sais nas camadas inferiores do solo .

O CV para o ECO em ambas as áreas e em todas as camadas do perfil do solo amostradas apresentaram moderada variabilidade dos dados. Os dados também apresentaram normalidade a 5% de significância. Isso pode ser observado analisando que as médias e as medianas encontram-se com valores próximos. Boubhziz et al. (2020) não encontraram normalidade dos dados, com 5 % de significância, e um alto valor do CV, porém ao retirarem os outliers, os dados apresentaram normalidade.

O solo na área é heterogêneo, o que é típico de solos aluviais. O acúmulo e dispersão desigual de depósitos de materiais de outras localidades, bem como a posição topográfica que ocupam e o manejo a que estão expostos, entre outros fatores, são as causas dessa variabilidade nesses solos.

A CE para as três camadas da área da Fazenda Primavera apresentou tendência quadrática, 70,7%, 77,60% e 81,26%, respectivamente. Para a área da MC, as camadas apresentaram tendência linear (99,57% e 86,72%). Seus semivariogramas foram construídos através dos resíduos do ajuste polinomial, no qual apresentaram efeito pepita puro, exceto a camada 0,20-0,40 da MC, para a qual o semivariograma ajustado (Figura 26) e validado foi o exponencial, com alcance de 9,09 m e o GDE foi de 36,72% sendo classificado como grau de dependência espacial moderada (Tabela 11).

Andrade et al (2012) explicam que mesmo quando os dados apresentam uma tendência reduzida, relatada pelos coeficientes de correlação das regressões lineares, pode ocasionar a não estacionaridade dos dados. Os autores falam que a alternativa é retirar o componente sistemático de cada conjunto de dados antes de realizar a análise geoestatística dos resíduos resultantes.

Segundo Pinheiro et al. (2021), o grau moderado de dependência espacial mostra que o solo sofre mais influência da falta de manejo, do que pelas propriedades do solo como densidade, porosidade, textura. Ressalte-se que a área já vem sendo utilizada a pelo menos 5 anos para cultivo de milho.

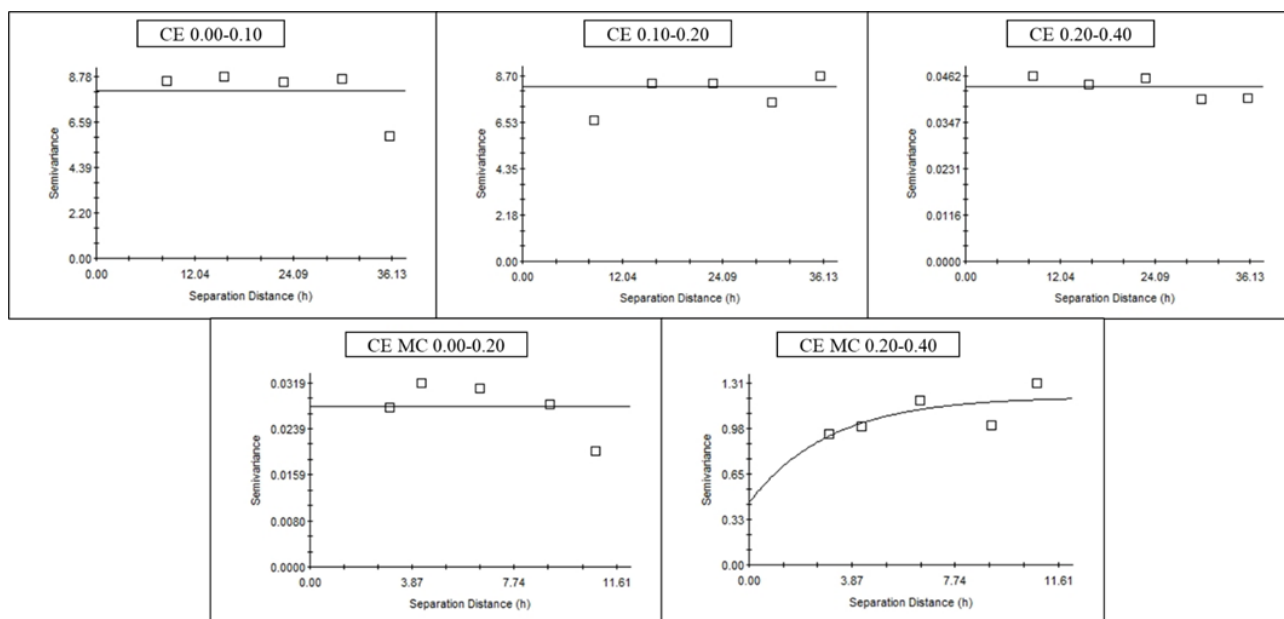


Figura 26 - Semivariogramas ajustados para CE.

Tabela 11 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados para CE e sua validação.

	Modelo	C0	C0+C1	A	GDE (%)	Jack Knifing	
						Média	Desvio Padrão
CE 0,00-0,10	Efeito Pepita Puro	8,108553				-	-
CE 0,10-0,20	Efeito Pepita Puro	8,221000				-	-
CE 0,20-0,40	Efeito Pepita Puro	0,043448				-	-
CE MC 0,00-0,20	Efeito Pepita Puro	0,027740				-	-
CE MC 0,20-0,40	Exponencial	0,445000	1,212000	9,0900	36,72	0,019	0,905

CE: Condutividade elétrica; MC: Mata ciliar; C0: Efeito pepita; C0+C1: Patamar; A: Alcance; GDE: Grau de dependência espacial.

Os ECO apresentaram tendência linear para as duas camadas da mata ciliar (94,62% e 96,06%) e para as duas últimas camadas da área da Fazenda Primavera (99,45% e 97%), a tendência quadrática se apresentou nas duas primeiras camadas da área da Fazenda Primavera (77,70% e 75,90%). Em ambas as áreas os semivariogramas para ECO (Figura 27) apresentaram efeito pepita puro em todas as camadas (Tabela 12).

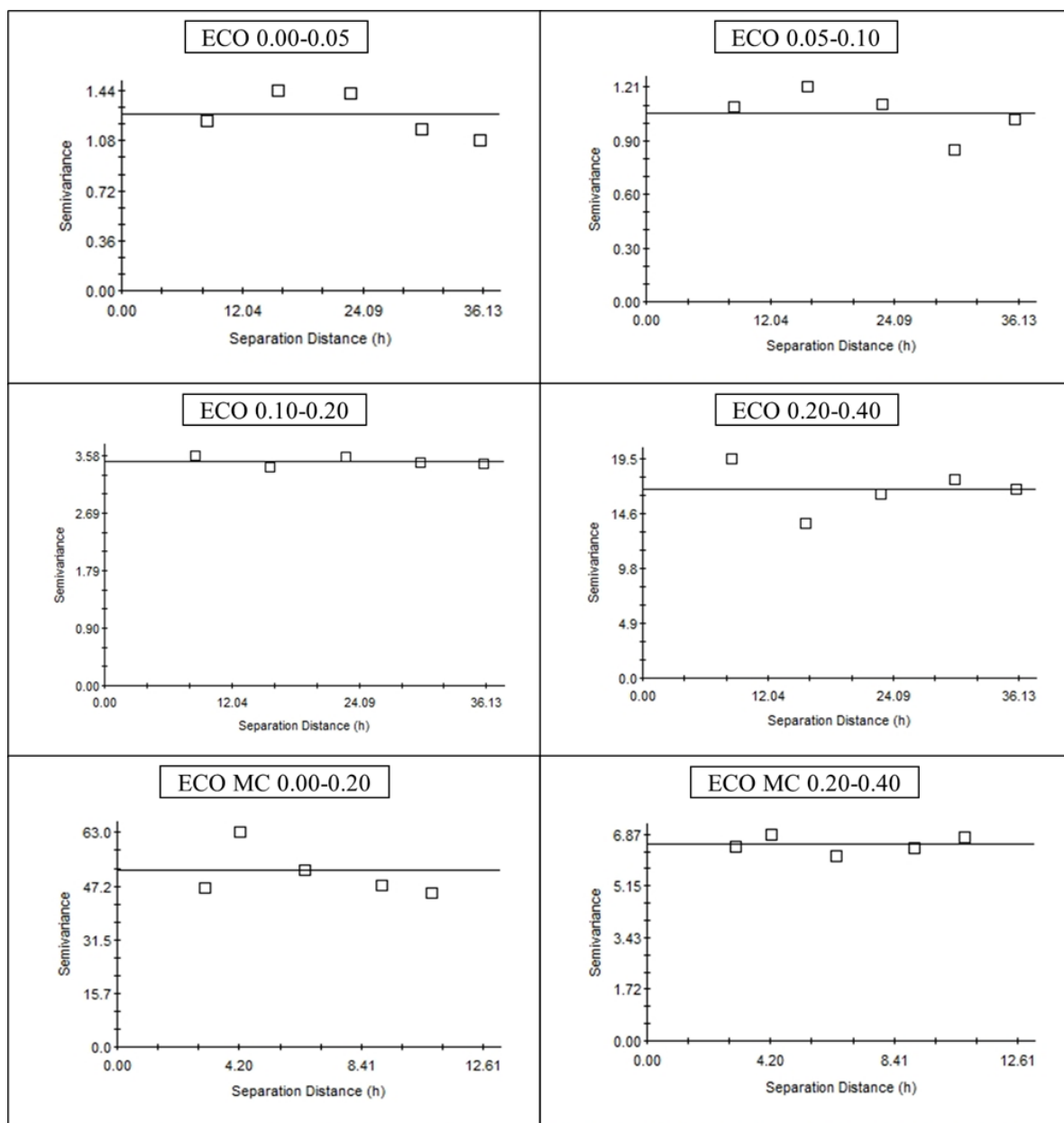


Figura 27 - Semivariogramas ajustados para ECO.

Tabela 12 - Parâmetros dos semivariogramas ajustados para ECO.

	Modelo	C0
ECO 0,0-0,05	Efeito Pepita Puro	1,279000
ECO 0,05-0,10	Efeito Pepita Puro	1,056895
ECO 0,10-0,20	Efeito Pepita Puro	3,496378
ECO 0,20-0,40	Efeito Pepita Puro	16,84258 1

ECO MC	Efeito	51,83000
0,00-0,20	Pepita Puro	0
ECO MC	Efeito	6,544000
0,20-0,40	Pepita Puro	

ECO: Estoque de carbono orgânico no solo; MC: Mata ciliar; C0: Efeito pepita.

Com a técnica geoestatística foi possível identificar a estrutura de dependência espacial. Utilizou-se o Método do Inverso do Quadrado da Distância para mapear ambas as áreas para as duas variáveis (Figura 28 e Figura 29), e observar que nas camadas 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m apresentaram maiores valores de CE no lado esquerdo inferior do mapa. Em contrapartida a MC apresentou uma área com baixos pontos de CE. A krigagem foi usada para mapear variável com dependência espacial.

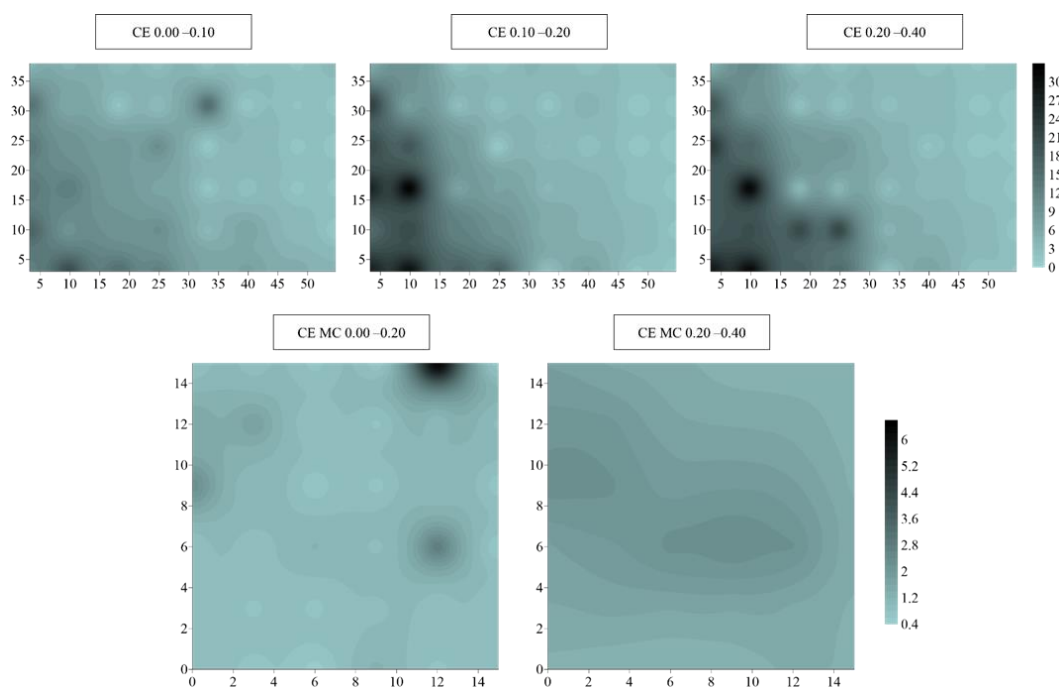


Figura 28 - Mapeamento das duas áreas para a CE.

No ECO as camadas 0,20-0,40 m apresentaram valores médios aproximados para a área da Fazenda Primavera (20,25 Mg.ha⁻¹) e para a área com Mata Ciliar (21,78 Mg.ha⁻¹). No mapeamento verifica-se que na Fazenda Primavera possui um maior ECO na última camada amostrada, o mesmo não ocorre para a mata ciliar, onde a camada que maior apresenta o estoque de carbono é a primeira, equivalente a profundidade de 0,00 -0,20 m. A presença de material orgânico pode neutralizar os efeitos negativos dos sais solúveis, tendo em vista que principal fonte de resíduos do componente orgânico do solo é a vegetação pelos processos

radiculares, Silva et al. (2008) explicam que a quantidade e o tipo de C liberado pela raiz, bem como as propriedades inerentes ao solo, ditam a extensão dessas alterações, porque as raízes metabolicamente ativas secretam diferentes tipos de substâncias químicas.

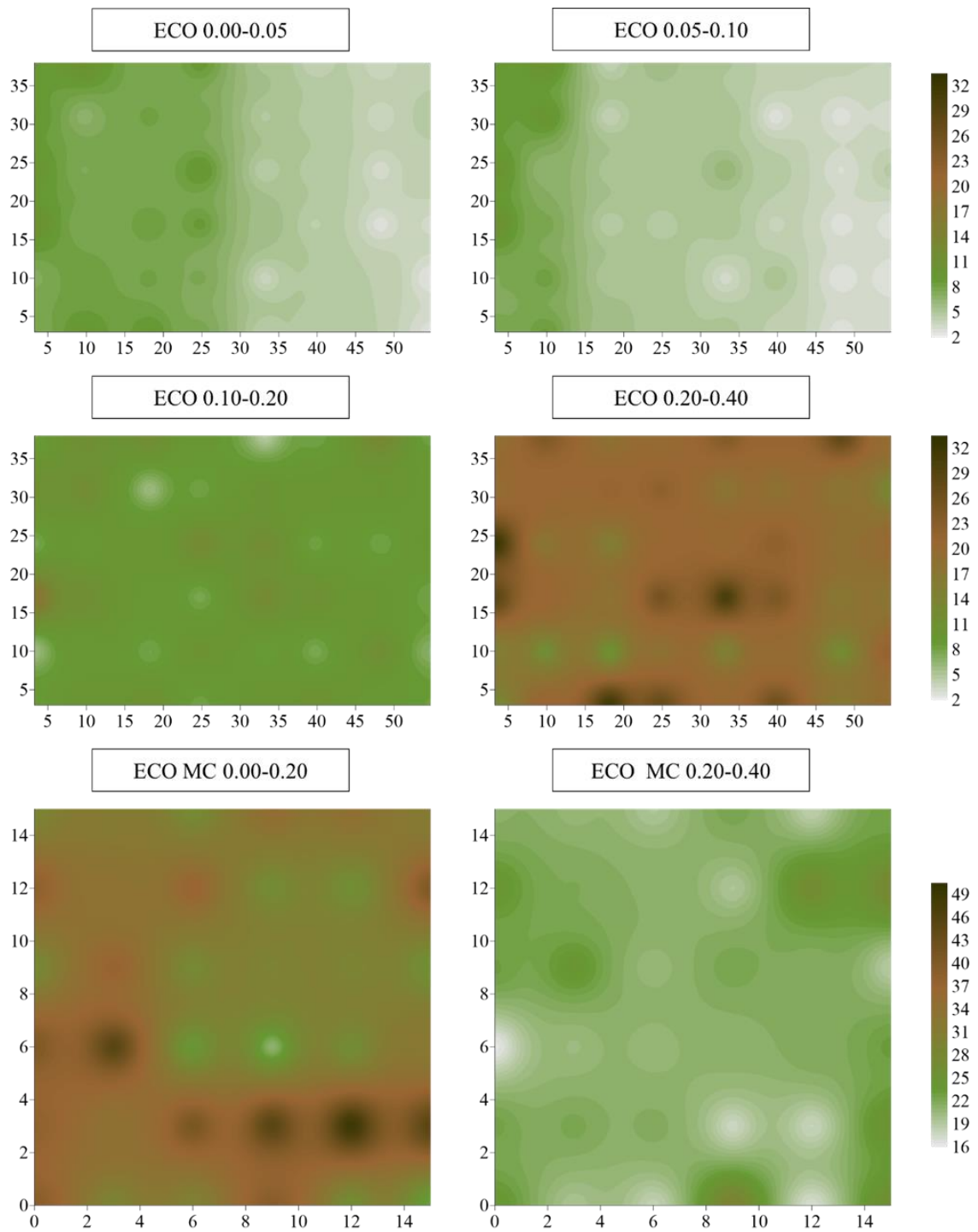


Figura 29 - Mapeamento do ECO para a área da Fazenda Primavera e da Mata Ciliar.

O solo com plantação de palma forrageira, anteriormente havia sido cultivado com milho e adubação, em solo exposto. Desse modo, o uso desses insumos concomitantemente o não uso de técnicas conservacionistas no manejo do solo, além das condições climáticas, ocasionaram o aumento dessa CE, em relação a MC, que possui solo coberto com serrapilheira e não possui ação antrópica. A condição descrita do solo da MC também pode ter influenciado o ECO, visto que nessa área os valores são mais elevados, o que entra de acordo ao que foi encontrado por Boubhziz et al. (2020), que concluíram, através do mapeamento da variável, que a cobertura de solo possui impacto na distribuição do ECO, visto que em uma floresta degradada possui altos teores de ECO, enquanto uma região semiárida com atividade agrícola intensiva possuiu valores mais baixos. A transição da cobertura vegetal nativa para pastagem e agricultura reduz os níveis de estoque de carbono (JESUS et al. 2019).

Avaliar os níveis de salinização, os perigos e as causas do excesso de sais nos solos de áreas propensas à desertificação tornam-se crucial, pois é um componente para o planejamento e promoção de políticas e ações públicas voltadas para a gestão adequada dos cada ambiente. Deste modo, é importante a adoção de práticas que auxiliem na mitigação da salinidade no solo e aporte de carbono orgânico, com o intuito aumentar a produtividade e evitar que a área se torne desertificada e infértil.

4 CONCLUSÃO

Para a área de estudo recomenda-se o uso de práticas conservacionistas, como uso de cobertura do solo, a fim de se obter uma maior eficiência na irrigação e aumentar o aporte de carbono orgânico no solo, aliado ao cultivo de culturas que seja resistentes a salinidade. Pois uma das principais causas da salinização do solo na área de pesquisa foi o manejo agrícola inapropriado, e os efeitos aumentam os perigos da desertificação no local.

Como esperava-se, em relação às variáveis ECO e a CE, para estimar a salinidade, como possíveis indicadores de qualidade do solo, fica evidente com esse estudo, que a mata ciliar apresentou melhor qualidade, por apresentar baixa salinidade e alto teor de ECO, comparando-se a área que possui cultivo de palma forrageira.

A geoestatística apesar de identificar a falta de dependência espacial para a maioria das profundidades amostradas foi satisfatória no mapeamento da área para estudar a ausência da dinâmica espacial das variáveis no momento inicial do estudo, sendo uma ferramenta que poderá auxiliar futuros manejos da área cultivada.

Conclui-se que esse capítulo servirá como um estudo básico sobre a variabilidade espacial dessas variáveis para que se empregue técnicas conservacionistas de água e solo com precisão.

Recomendando-se para futuros estudos na área de pesquisa, análises sobre variabilidade espaço e temporal de fatores físico-hídricos do solo são aconselhados para possibilitar o desenvolvimento de padrões com a utilização de cobertura de solo e água de reúso tratado para irrigação. Depois disso, com base nos valores de PST e CTC, podem ser aplicados os corretivos relevantes, determinação de cronogramas de lavagem dos sais solúveis que estão em excesso, a fim de proporcionar a restauração da área.

Para manter um equilíbrio saudável de sais no solo e evitar o aumento do lençol freático, devem ser feitas pesquisas sobre culturas localmente adaptáveis à salinidade, bem como a determinação de lâminas de irrigação.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, p.711-728, 2013.

ANDRADE, T. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; RODRIGUES, D. F. B. Variabilidade espaço-temporal da condutividade elétrica da água subterrânea na região semiárida de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n.5, p. 496-504, 2012.

ASSAD, E. D.; MARTINS, S. C.; CORDEIRO, L. A. M.; EVANGELISTA, B. A. Sequestro de carbono e mitigação de emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas integrados. **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta. Brasília: Embrapa**, p. 153-167, 2019.

BOUBEHZIZ, S.; KHANCHOU, K.; BENSLAMA, M.; BENSLAMA, A.; MARCHETTI, A.; FRANCAVIGLIA, R.; PICCINI, C. Predictive mapping of soil organic carbono in Northeast Algeria. **Catena**, v. 190, 2020.

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

CASTRO, F. C.; SANTOS, A. M. Salinidade do solo e risco de desertificação na região semiárida. **Mercator (Fortaleza)**, v. 19, 2020.

DINH, Q. T.; LIANG, D.; THI ANH THU, T.; Le, T. D. H.; DINH VUONG, N.; PHAM, V. T. Spatial prediction of saline and sodic soils in rice-shrimp farming land by using integrated

artificial neural network/regression model and kri-ging. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 64, n. 3, p. 371-383, 2018.

DUARTE, S. N., SILVA, E. F. F., MIRANDA, J. H., MEDEIROS, J. F., COSTA, R. N. T., GHEYI, H. R.; Fundamentos de Drenagem Agrícola, Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade, Fortaleza - CE, 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5 ed. Brasília, DF: Embrapa, 353p ,2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solos. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 574 p, 2017.

FERREIRA, A. O.; AMADO, T. J. C.; RICE, C. W.; DIAZ, D. A. R.; BRIEDIS, C.; INAGAKI, T. M.; GONÇALVES, D. R. P. Driving factors of soil carbono accumulation in Oxisols in long-term no-till systems of South Brazil. **Science of the Total Environment**, 622-623, p. 735-742, 2018.

FIDALGO, E. C. C.; BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; MADARI, B. E.; COELHO, M. R.; MOURA, I. B.; LIMA, C. X. Estoque de Carbono nos Solos do Brasil. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Rio de Janeiro - RJ, 2007.

FREIXO, A. A.; MACHADO, P. L. O. A.; GUIMARÃES, C. M.; SILVA, C. A.; FADIGAS, F. S. Estoques de carbono e nitrogênio e distribuição de frações orgânicas de Latossolo do Cerrado sob diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 425 – 434, 2002.

GONÇALVES, D. R. P.; SÁ, J. C. M.; MISHRA, U.; FORNARI, A. J.; FURLAN, F. J. F.; FERREIRA, L. A.; INAGAKI, T. M.; ROMANIW, J.; FERREIRA, A. O.; BRIEDIS, C. Conservation agriculture based on diversified and high-performance production system leads to soil carbono sequestration in subtropical environments. **Journal of Cleaner Production**, v. 219, p. 136 – 147, 2019.

HOAGLIN, D. C.; MOSTELLER, F.; TUKEY, J. W. Análise exploratória de dados: Técnicas robustas. Lisboa: Edições Salamandra. 1992. 446p.

JESUS, K. N.; ALBUQUERQUE, E. R. G. M.; SAMPAIO, E. S.; SALES, A. T. Estoques de carbono em solos de Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 3, p. 714-721, 2019.

JUSTO, J.; BARRETO, A.; SILVA, J.; FERREIRA NETO, M.; SÁ, FRANCISCO.; OLIVEIRA, R. Identificação e diagnóstico de solos afetados por sais no perímetro irrigado Baixo-Açu, RN, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 7, p. 480-484, 2021.

LANDIM, P. M. B. Análise estatística de dados geológicos. 2.ed. São Paulo: UNESP. 2003. 253p.

LINS, F. A. C.; LOPES, I.; MONTENEGRO, A. A. A. Variabilidade espacial da umidade e condutividade elétrica do solo em vale aluvial utilizando técnicas geofísicas. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 6, n. 1, p. 56-63, 2020.

LOPES, I. & MONTENEGRO, A. A. A. Spatialization of electrical conductivity and physical hydraulic parameters of soils under different uses in na aluvial valley. **Revista Caatinga**, v. 32, n 1, p. 222-233, 2019.

MARINHO JUNIOR, J. L.; LIMA, D. S.; DIAS, J. L. A.; ARAÚJO FILHO, R. N. Análise dos estoques de carbono no solo sob diferentes coberturas vegetais no Brasil (revisão). **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 8, n. 1, p. 31-40, 2020.

MINHAS, P. S.; RAMOS, T. B.; BEN-GAL, A.; PEREIRA, L. S. Coping with salinity in irrigated agriculture: Crop evapo-transpiration and water management issues. **Agricultural Water Management**, v. 227, p. 105832, 2020.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 30-37, 2006.

NANZER, M. C.; ENSINAS, S. C.; BARBOSA, G. F.; BARRETA, P. G. V.; OLIVEIRA, T. P.; DA SILVA, J. R. M.; PAULINO, L. A. Estoque de carbono orgânico total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no Cerrado. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 18, n.1, p. 136- 145, 2019.

NIÑEROLA, V. B.; NAVARRO-PEDREÑO, J.; LUCAS, I. G.; PASTOR, I. M.; VIDAL, M. M. J. Geostatistical assessment of soil salinity and cropping systems used as soil phytoremediation strategy. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 174, p. 53-58, 2017.

RICHARDS, L. A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. 1. ed. Washington, DC: AGRICULTURE HANDBOOK, 160 p, 1954.

RODRIGUES, M. S.; ALVES, D. C.; CUNHA, J. C.; LIMA, A. M. N.; CAVALCANTE, I. H. L.; DA SILVA, K. A.; DE MELO JUNIOR, J. C. F. Spatial analysis of soil salinity in a mango irrigated area in semi-arid climate region. **Australian Jour-nal of Crop Science**, v. 12, n. 8, p. 1288, 2018.

SÁ, J. C. M.; GONÇALVES, D. R. P.; FERREIRA, L. A.; MISHRA, U.; INAGAKI, T. M.; FURLAN, F. J. F.; MORO, R. S.; FLORIANI, N.; BRIEDIS, C.; FERREIRA, A. O. Soil carbono fractions and biological activity based índices can be used to study the impact of lanc management and ecological successions. **Ecological Indicators**, v. 84, p. 84 – 105, 2018.

SAFDAR, H.; AMIN, A.; SHAFIQ, Y.; ALI, A.; YASIN, R.; SHOUKAT, A.; HUSSAN, M. U.; SARWAR, M. I. A review: impact of salinity on plant growth. **Nature and Science**, v.17, p.34-40, 2019.

SHANKAR, V.; EVELIN, H. Strategies for reclamation of saline soils. In: Giri, B.; Varma, A. (ed.). **Microorganisms in saline environments: Strategies and functions**. Cap. 19, Cham: Springer. p.439- 449, 2019.

SILVA, C. M. M. S.; VIEIRA, R. F.; OLIVEIRA, P. R. Salinidade, sodicidade e propriedades microbiológicas de Argissolo cultivado com erva-sal e irrigado com rejeito salino. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 43, n.10, p. 1389-1396, 2008.

SILVA JÚNIOR, J. M. T.; TAVARES, R. C.; MENDES FILHO, P. F.; GOMES, V. F. F. Efeitos de níveis de salinidade sobre a atividade microbiana de um Argissolo Amarelo incubado com diferentes adubos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, vol. 4, n. 4, p. 378-382, 2009.

TEDESCHI, A. & DELL'AQUILA, R. Effects of irrigation with saline waters, at different concentrations, on soil physical and chemical characteristics. **Agricultural Water Management**, v.77, p.308-322, 2005.

TONDOH, J. E.; OUÉDRAOGO, I.; BAYALA, J.; TAMENE, L.; SILA, A.; VAGEN, T.-G.; KALINGANIRÉ, A. Soil organic carbono stocks in semi-arid West African drylands: implications for climate change adaptation and mitigation. **Soil Discuss.**, p.1-41, 2016.

VAUCLIN, M.; VIEIRA, S. R.; VACHAUD, G.; NIELSON, D. R. The Use of Cokriging with Limited Field Soil Observations1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 47 n. 2 , p. 175–184, 1983.

VERONESI, F. & SCHILLACI, C. Comparison between geostatistical and machine learning models as predictors of topsoil organic carbon with a focus on local uncertainty estimation. **Ecological Indicators**, v. 101, p. 1032-1044, 2019.

VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, v.45, p.1040-1048, 1981.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field In: Hillel, D. Applications of soil physics. New York: Academic, p. 319-344, 1980.

XU, L.; DU, H.; ZHANG, X. Spatial Distribution Characteristics of Soil Salinity and Moisture and Its Influence on Agri-cultural Irrigation in the Ili River Valley, China. **Sustainability**, v. 11, n. 24, p. 7142, 2019.

YEOMANS, J. O.; BREMMER, J. M. A. rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, p. 1467-1476, 1988.

ZHOU, Y.; HARTEMINK, A. E.; SHI, Z.; LIANG, Z.; LU, Y. Land use and climate change effects on soil organic carbono in North and Northeast China. **Science of the Total Environment**, v. 647, p. 1230 – 1238, 2019.

CAPÍTULO IV: ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DA UMIDADE DO SOLO NA PRESENÇA E AUSÊNCIA DE COBERTURA MORTA EM SOLO ALUVIAL

FONSECA, A. C. N. Análise da distribuição da umidade do solo na presença e ausência de cobertura morta em solo aluvial. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2022.

Resumo

O estudo do comportamento da umidade do solo em áreas de produção agrícola, particularmente na zona semiárida, é fundamental, mas a amostragem e medição de campo podem ser caras e demoradas. A metodologia de estabilidade temporal permite uma redução na amostragem para avaliação das propriedades de física do solo, associada a técnica da geoestatística. Dessa forma, o objetivo desse capítulo foi avaliar a estabilidade temporal e o comportamento da umidade do solo em função da presença e ausência de cobertura morta em uma área cultivada com palma forrageira utilizando sensor FALKER HidroFarm para determinação da umidade. A coleta de dados aconteceu em área experimental na Fazenda Primavera, localizada no município de Parnamirim - PE. A área experimental possui 2.378 m² e está atualmente cultivada com palma forrageira (*Opuntia sp.*). A textura do solo foi caracterizada como franco argilo siltoso e sua condutividade hidráulica determinada pelo método do Beerkan. Com o objetivo de avaliar a estabilidade temporal da influência da cobertura morta, constituída pela vegetação disponível (palhada de milho e capim), foi determinado um transecto na área experimental, com dimensão de 13 m, na fileira dupla das palmas, totalizando 44 palmas, onde possuía tratamento com cobertura e sem cobertura. Sensores FALKER HidroFarm HFM 1010 de umidade foram posicionados a uma distância entre eles de 1 m. As medições foram realizadas no intervalo de tempo de 2 h. Além do transecto também foram coletadas amostras de solo não deformadas em anel volumétrico em duas profundidades: 0 – 0,05 m e 0,05 – 0,10 m. Na área com cobertura, o ponto de medição que apresentou a diferença relativa mais próxima de zero foi o CC2, com valor de 2.39 ($\pm 7,92\%$). Para o setor sem cobertura, o ponto mais representativo foi o SC2, com DR de 0.2 ($\pm 6,95\%$). A utilização de sensores FALKER HidroFarm apresentou adequado desempenho, apesar das dificuldades associadas às propriedades físicas deste solo.

Palavras-chaves: Semiárido; Escassez de água; Produção agrícola; Estabilidade temporal.

FONSECA, A. C. N. Analysis of soil moisture distribution in the presence and absence of mulch in alluvial soil. Dissertation (Master's in Agricultural Engineering) – Federal Rural University of Pernambuco, 2022.

Abstract

The study of soil moisture behavior in agricultural production areas, particularly in the semi-arid zone, is fundamental, but field sampling and measurement can be expensive and time-consuming. The methodology of temporal stability allows a reduction in the sampling for the evaluation of the physical properties of the soil, associated with the technique of geostatistics. Thus, the objective of this chapter was to evaluate the temporal stability and behavior of soil moisture as a function of the presence and absence of mulch in an area cultivated with forage cactus using a FALKER HidroFarm sensor for moisture determination. Data collection took place in an experimental area at Fazenda Primavera, located in the municipality of Parnamirim - PE. The experimental area has 2,378 m² and is currently cultivated with forage cactus (*Opuntia* sp.). Soil texture was characterized as silty clay loam and its hydraulic conductivity was determined by the Beerkan method. With the objective of evaluating the temporal stability of the influence of the mulch, constituted by the available vegetation (corn straw and grass), a transect was determined in the experimental area, with a dimension of 13 m, in the double row of palms, totaling 44 palms, where there was treatment with coverage and without coverage. FALKER HidroFarm HFM 1010 humidity sensors were positioned at a distance of 1 m between them. Measurements were performed at a time interval of 2 h. In addition to the transect, undeformed soil samples were also collected in a volumetric ring at two depths: 0 – 0.05 m and 0.05 – 0.10 m. In the covered area, the measurement point that presented the closest relative difference to zero was CC2, with a value of 2.39 ($\pm 7.92\%$). For the sector without coverage, the most representative point was SC2, with a DR of 0.2 ($\pm 6.95\%$). The use of FALKER HidroFarm sensors showed adequate performance, despite the difficulties associated with the physical properties of this soil.

Keywords: Semiarid; Water shortage; Geostatistics; Agricultural production; Temporal stability.

1 INTRODUÇÃO

O semiárido apresenta características que podem ser limitantes para a produção agropecuária, como a alta variabilidade espaço-temporal das precipitações pluviométricas, o que podem ocasionar um déficit hídrico, acometendo uma indisponibilidade de forragem, o qual compromete a produção animal (CAMPOS et al., 2017; ALVES et al., 2020). Concomitante a isso, a falta de recursos financeiros e tecnológicos impactam a produtividade na região.

Uma forma de minimizar esses impactos é o reuso de efluentes tratados na irrigação, o manejo da cobertura do solo, com o objetivo de minimizar a escassez de água e aumentar o aporte de nutrientes (LOPES et al., 2019), atrelado ao cultivo da palma forrageira (*Opuntia* spp. e *Nopalea* spp.), uma vez que suas particularidades morfofisiológicas são eminentemente adaptadas às condições edafoclimáticas da região semiárida (ALVES et al., 2020; AMORIM et al., 2017; LIMA et al., 2021). A palma é uma das principais forrageiras da região Nordeste do Brasil, especialmente nos estados de Alagoas e Pernambuco, no qual são utilizadas na alimentação de rebanhos (CARVALHO et al., 2017).

As práticas conservacionistas podem ser uma aliada aos produtores da região por auxiliar na redução da evapotranspiração, evitar o escoamento de água e erosão do solo (MONTENEGRO ET AL., 2013; BERTONI & NETO, 2014). Mendonça et al. (2019) concluíram que com o uso da cobertura morta foi possível uma redução na lâmina de irrigação, ocasionando uma economia de 12,3% do uso da água. Santos et al (2007). constataram que a cobertura morta reduz a velocidade de escoamento e aumenta a capacidade de infiltração e retenção de água, com reduções de erosão muito significativas quando comparadas a solos com superfície exposta, em estudo realizado no semiárido pernambucano, com o objetivo de verificar a influência dos diferentes tipos de cobertura no escoamento superficial da água no solo em condições de campo.

A investigação do comportamento da umidade do solo em áreas de produção agrícola, principalmente no semiárido é de extrema importância, porém a sua amostragem e medição em campo, pode ser onerosa e demorada (CARVALHO et al., 2017). Estudos analisando a distribuição espaço temporal da umidade no solo vem sendo conduzidos, sendo relevantes para o manejo hídrico racional (ARAUJO et al., 2019; CARVALHO et al., 2017; SILVA JUNIOR et al., 2016; SOUZA et al., 2011).

A metodologia proposta por Vachaud et al. (1985) de estabilidade temporal permite uma redução na amostragem para avaliação das propriedades de física do solo. Esse método é composto por duas técnicas, que não prejudicam a estruturação dos dados, são eles: Diferença Relativa e o Teste não paramétrico de Spearman.

Desta forma, considerando a relevância da dinâmica da umidade do solo para a produção agrícola, principalmente em regiões semiáridas, bem como a necessidade de um número reduzido de pontos necessários para a caracterização dessa dinâmica, o objetivo deste estudo foi avaliar a estabilidade temporal, por diferença relativa e a variabilidade da umidade do solo em função da presença de cobertura morta em uma área experimental do semiárido Pernambucano, com palma forrageira, utilizando sensor de umidade.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

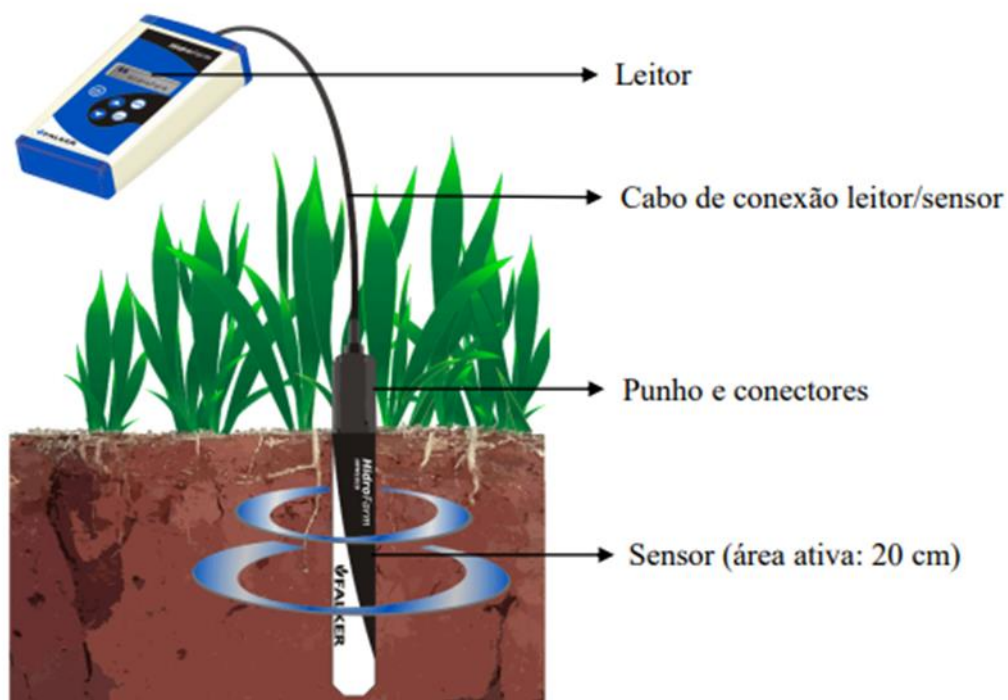
A coleta de dados aconteceu no período de 6 a 13 de dezembro de 2021, em área experimental na Fazenda Primavera, localizada no município de Parnamirim, situado no sertão de Pernambuco, distante aproximadamente 560 km de Recife – PE.

Para a determinação da textura do solo da camada superficial, foram coletadas 24 amostras não deformadas na área experimental, levadas a laboratório e determinadas as frações granulométricas utilizando-se o método do hidrômetro de Bouyoucos. A condutividade hidráulica foi determinada através da metodologia Beerkan, descrita por Santos et al. (2018), Souza et al. (2008) e Pinheiro et al. (2021).

Em uma grade de 1 m², foram capturadas imagens digitais para obtenção do índice de área coberta ao longo da superfície. Para realizar o processamento das imagens foi utilizado o software ArcGIS.

2.2 Monitoramento da umidade do solo

Com o objetivo de avaliar a estabilidade temporal da umidade sob influência da cobertura morta, constituída pela vegetação disponível (palhada de milho e capim). O monitoramento foi realizado com o uso de sensores FALKER HidroFarm HFM 1010 que têm a capacidade de fornecer leituras instantâneas, à profundidade e dentro de um diâmetro ativo de 20 cm (Figura 30). A leitura de umidade máxima do dispositivo é de 60%, umidade acima desse valor o sensor informa que o solo se encontra saturado.



Fonte: Fabricante/Falker

Figura 30 - Componentes do Sensor Falker HidroFarm.

Foi estabelecido um transecto com dimensão de 13 m, na fileira dupla das palmas, envolvendo 44 palmas, onde abrangia os tratamentos com cobertura e sem cobertura do solo (Figura 31). Os sensores foram espaçados com espaçamento de 1 m, totalizando 12 pontos amostrais que foram colocados próximo das plantas (Figura 32). As medições foram realizadas no intervalo de tempo de 2 h, totalizando 5 medições por dia. As avaliações tiveram início no dia 6 de dezembro de 2021, às 08h00, após um acumulado de precipitações de 36,5 mm, determinados por um pluviômetro instalado na área, e finalizadas no dia 13 de dezembro às 16 h. Ao todo foram realizadas 31 leituras.

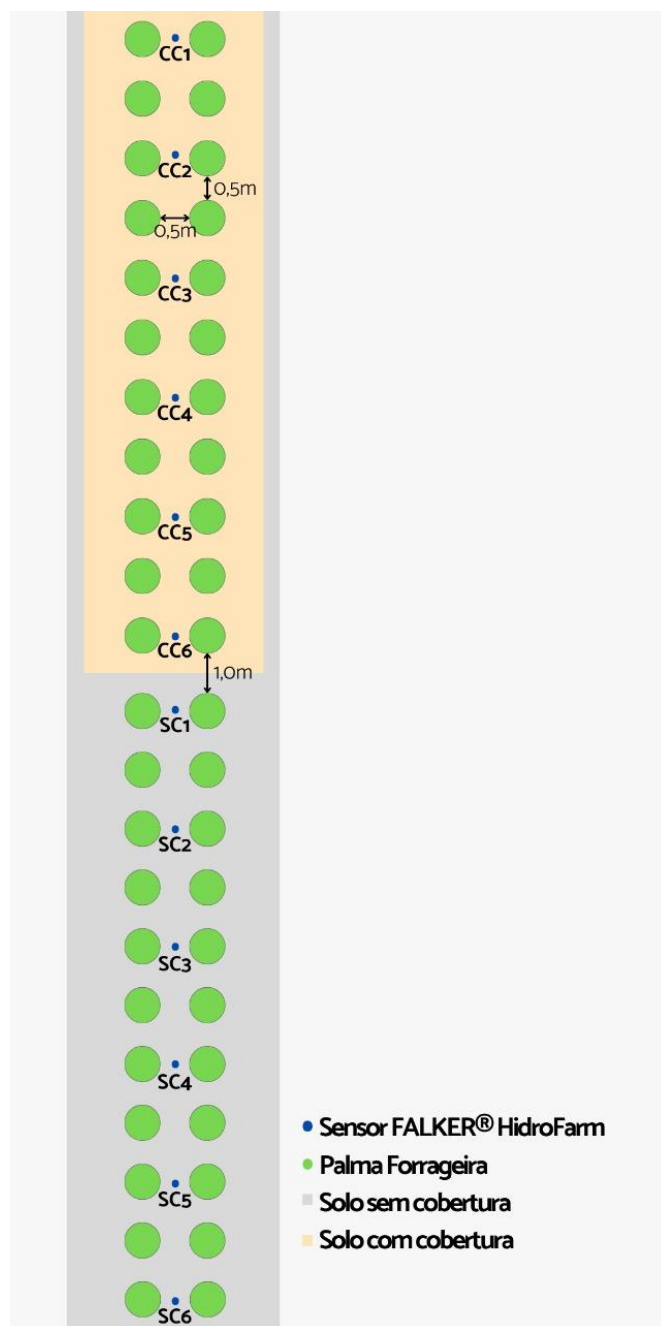
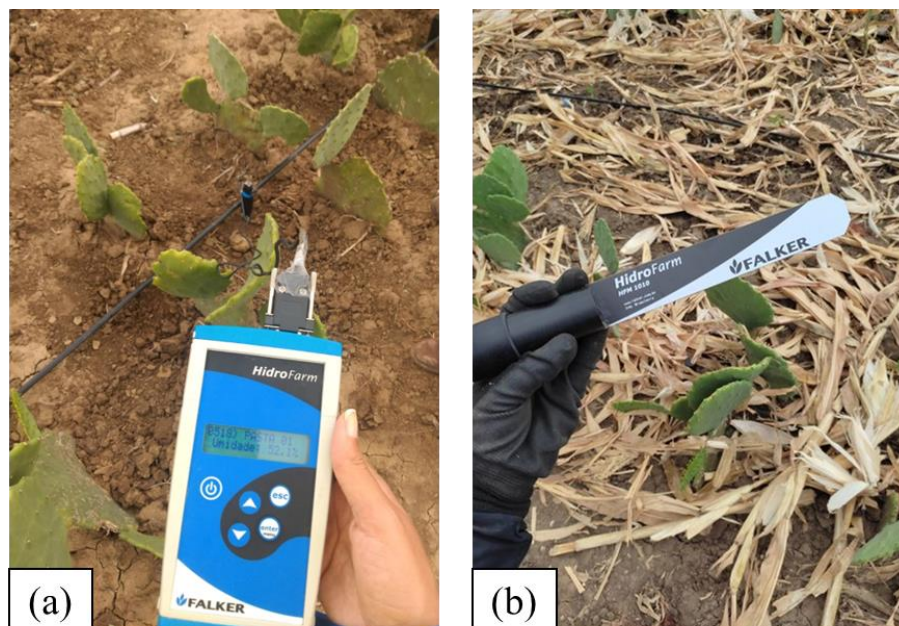


Figura 31 - Esquema do transecto, posicionamento dos sensores e tratamentos com cobertura e sem cobertura.



Fonte: Autor, 2022.

Figura 32 - a) Manuseio do sensor em campo; (b) Sensor de umidade Falker[®].

2.3 Delineamento experimental

Foram considerados 4 blocos e 6 tratamentos por bloco, no qual os tratamentos se diferenciavam por ausência ou presença de cobertura morta e o tipo de consórcio implantado (Tabela 13) (Figura 33 e 34). Foram selecionados 48 pontos amostrais e suas coordenadas x e y determinadas (Figura 35). Nesses pontos foram coletadas amostras de solo não deformadas em anel volumétrico em duas camadas: 0 – 0,05 m e 0,05 – 0,10 m.

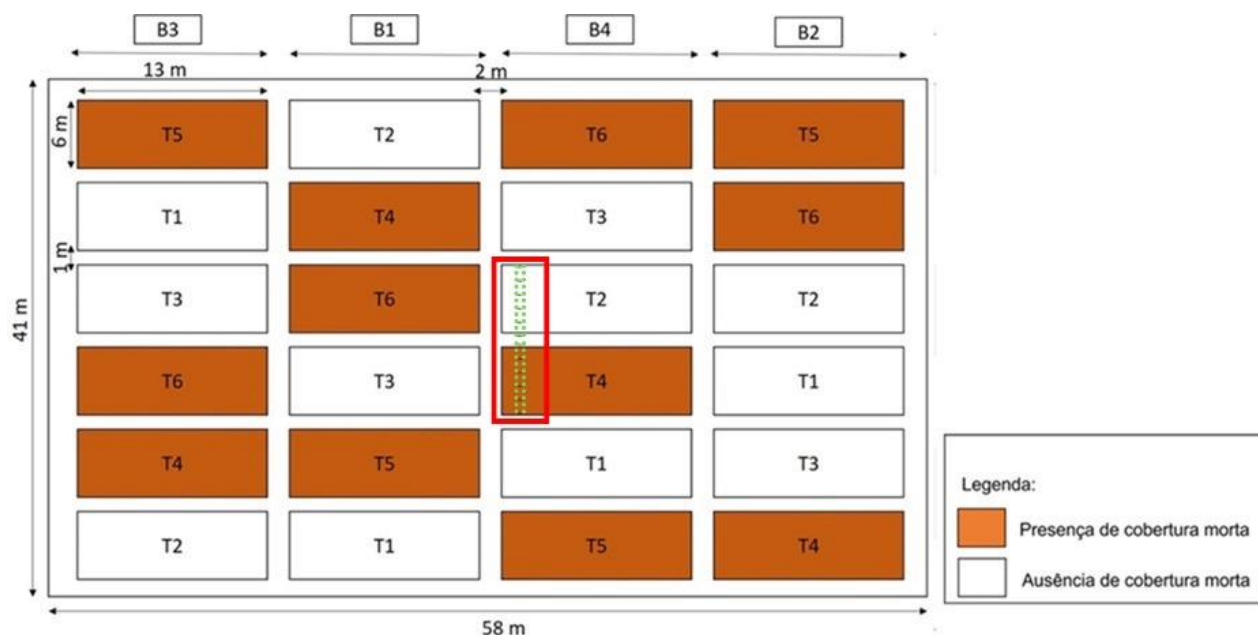


Figura 33 - Croquis da área experimental destacando a posição do transecto.

Tabela 13 - Sorteio dos cultivos dos tratamentos

Nomenclatura	Tratamento
T1	Ausência de cobertura morta Plantio: Palma forrageira + Moringa
T2	Ausência de cobertura morta Plantio: Palma forrageira + Gliricídia
T3	Ausência de cobertura morta Plantio: Palma forrageira + Sorgo
T4	Presença de cobertura morta Plantio: Palma forrageira + Moringa
T5	Presença de cobertura morta Plantio: Palma forrageira + Gliricídia
T6	Presença de cobertura morta Plantio: Palma forrageira + Sorgo



Figura 34 - Tratamento com cobertura e tratamento sem cobertura.

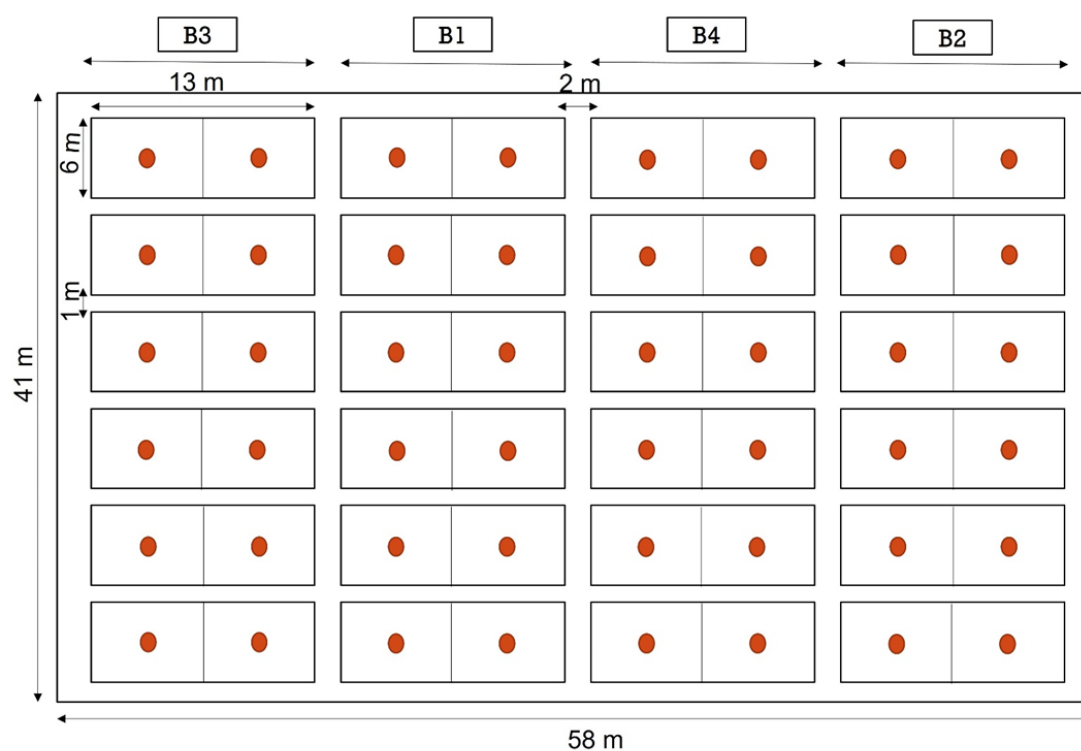


Figura 35 - Pontos amostrais determinados para a coleta de umidade através do anel volumétrico.

2.4 Calibração do sensor

Para a calibração do sensor Falker^R, foram conduzidos experimentos em in situ e em laboratório utilizando água deionizada e níveis de salinidade, no Laboratório de Água e Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco. A justificativa de ter se aplicado várias metodologias para a calibração foi a dificuldade de drenagem que o solo apresentou.

2.4.1 Calibração com amostras não deformadas

Para essa calibração necessitou de coleta de perfil de solo em 30 cm não deformada, no qual se fez a amostragem através de tubos de PVC, para posteriormente em laboratório saturar com água destilada os perfis por capilaridade.

Essa calibração seguiu as seguintes etapas:

- a) Coleta em campo de 3 perfis não saturados e armazenamento para não danificar a estrutura do solo;
- b) Direcionamento das amostras para o Laboratório de Água e Solo na UFRPE;
- c) Na base inferior dos canos de PVC, colocação de um “cap”;
- d) Os perfis foram pesados e posteriormente,
- e) Em um balde com água destilada, os perfis de solo foram inseridos para serem saturados por capilaridade.

2.4.2 Calibração com amostras deformadas por densidade.

Para a segunda metodologia, foram coletadas amostras de solo em pontos da área de estudo, compreendendo a camada de 0,00 a 0,20 m. Homogeneizou-se as amostras, que foram secas ao ar, destorroadas e passadas em uma peneira com malha de 0,005 mm.

Três colunas de acrílico com diâmetro 6 cm foram pesadas e preenchidas aproximadamente a uma altura de 28 cm de solo, de modo a que o peso do solo seco sem o das colunas de acrílico fossem aproximadamente 950g. O fundo dessas colunas era poroso, para que elas fossem saturadas por capilaridade e posteriormente fossem drenadas.

Antes de prosseguir com a calibração foi necessário pesar as colunas de acrílico, o solo e o sensor. Após a soma desse sistema, saturaram-se o solo com água deionizada, por capilaridade.

Após saturado o solo, colocou-se na bancada o sistema, e uma luz infravermelha sobre as colunas, com o objetivo de secar o solo. O objetivo era calibrar por diferença de massa, relacionando as medições dos sensores.

2.4.3 Calibração *in situ*

Foi realizada uma tentativa de calibração *in situ*, no qual eram administradas medições em campo com os sensores e coletadas as amostras de solo com trado em regiões próximas aos sensores. As umidades foram estimadas pelo Método Gravimétrico.

As amostras ao chegarem no laboratório foram secas em estufa, e sua umidade calculada em base de massa (Equação 9). Realizou-se análise de regressão e o coeficiente de determinação (R^2) associado estimado.

$$U = \frac{MSU - MSS}{MSS} \quad \text{(Equação 9)}$$

Sendo:

U = umidade a base de massa

Msu = massa do solo úmido

Mss = massa do solo seco

2.4.4 Calibração para diferentes níveis de salinidade

Essa metodologia também adotada para a calibração foi baseada no estudo de Matula et al. (2016), que realizaram o processo de calibração em que nove teores sucessivos de água no solo foram lidos e medidos, começando da capacidade de campo até o ponto de murcha permanente, sob várias condições de salinidade da água.

Para esse estudo foram empregadas duas condições de salinidade: 0 dS.m⁻¹ (testemunha) e 10 dS.m⁻¹ com três repetições cada. As amostras continham 1885g de solo seco em estufa, foram montadas com tubos de PVC para colunas de 20 cm de altura com densidade de 1,2 g.cm⁻³ para o solo da área experimental.

A correlação entre a umidade calculada e as lidas pelo sensor é usada para calibrar os resultados. O cálculo da umidade se dá pela equação 9.

As amostras foram submetidas à luz infravermelha e à luz solar, e adotados dois dias de drenagem.

2.4.5 Calibração método inverso

Esta metodologia de calibração é a inversa do procedimento anterior, que consistiu em iniciar o processo de leitura com amostras deformadas de solo seco em estufa e adicionar quantidades pré-determinadas de água antes de cada leitura.

Foram construídas três colunas de solo, uma em PVC de 100 mm de diâmetro (testemunha, $CE = 0 \text{ dS.m}^{-1}$) e as demais em tubos de acrílico de 60 mm de diâmetro, pela técnica de Rodrigues (2016) e umedecidas com soluções de condutividade: 0; 5; e 10 dS.m^{-1} .

A coluna de PVC passou a pesar 2,167,70 g de solo para uma coluna de 23 cm de altura, enquanto as amostras nos tubos de acrílico tinham 26 cm de altura e 882,16 g de solo devido às propriedades geométricas do tubo.

Para a coluna de PVC (testemunha) foram seguidas essas etapas:

- a) A cada 10 minutos, 5 g de água destilada são adicionados ao processo de umedecimento da coluna;
- b) A leitura da umidade pelo sensor, bem como a pesagem da amostra, ocorre no mesmo intervalo de tempo que a etapa anterior;
- c) O volume de água foi aumentado para 20 g após 9 leituras devido à pequena variação de umidade relatada em cada leitura;
- d) Deste modo, após 8 medições, o solo atingiu a saturação do sensor, que foi registrado como "Erro: Solo saturado".

Para as colunas de acrílico (5 dS.m^{-1} e 10 dS.m^{-1}), começou aplicando 20 g de solução por leitura. Com sete leituras, a umidade do solo variou de 8,6% a 60% na medição de $5,0 \text{ dS.m}^{-1}$. Optou-se por não seguir intervalos regulares de 10 minutos entre cada leitura durante a medição da amostra de 10 dS.m^{-1} , mas sim examinar sua estabilização no leitor.

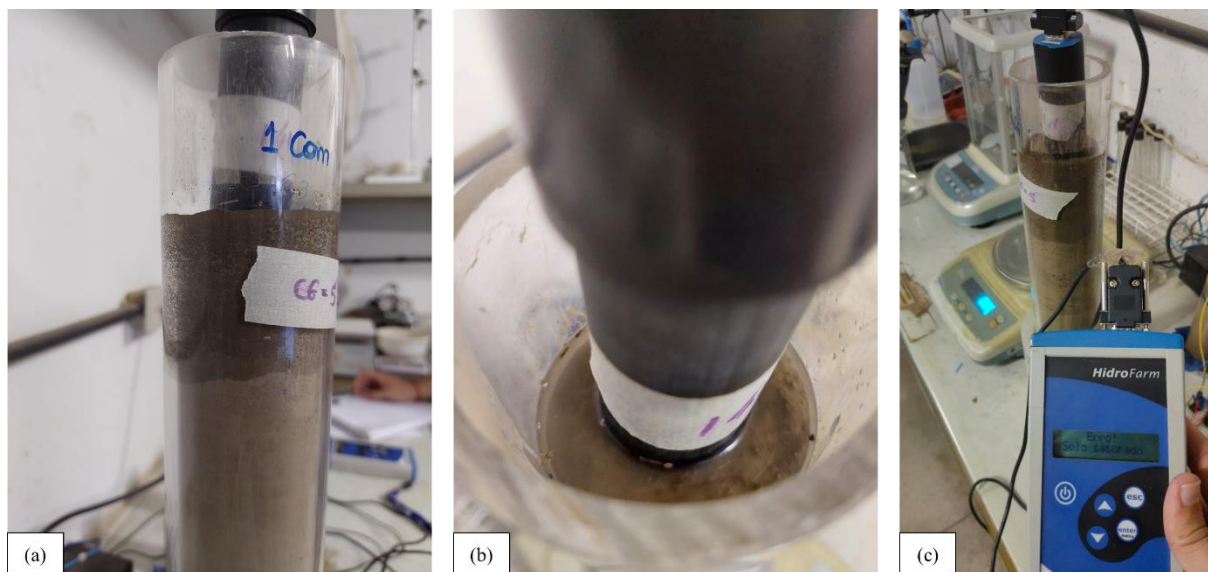


Figura 36 - Saturação das colunas de acrílico para a metodologia de Rodrigues (2016)

Dessa maneira, os gráficos de dispersão foram conduzidos análises de regressão linear, relacionando a umidade volumétrica (g/g) e as leituras de umidade do sensor (porcentagem), para se obter as curvas de calibração do sensor para as variadas condições de salinidade da água.

2.5 Análise Estatística

A análise estatística descritiva dos dados consistiu na verificação das medidas de tendência central, dispersão e aderência à distribuição normal pelo teste de Komolgorov-Smirnov, a 5% de probabilidade. Através do critério de limite superior e inferior de Hoaglin et al. (1992), os dados discrepantes foram eliminados.

Para a caracterização da variabilidade dos dados, utilizou-se a classificação de Warrick & Nielsen (1980), no qual o coeficiente de variação é analisado, considerando baixa variabilidade quando o $CV < 12\%$, média variabilidade para o CV entre 12% e 60% e alta variabilidade dos dados para o CV igual ou superior a 60%.

2.6 Estabilidade temporal

Os dados de umidade obtidos no transecto foram comparados para verificar qual localização apresentou maior estabilidade, e com a finalidade da investigação da estabilidade

temporal da umidade, utilizou-se a metodologia proposta por Vachaud et al. (1985). Esses autores propuseram a técnica de Diferenças Relativas, que consiste em realizar análises de desvio entre os valores observados, individualmente, e o valor médio de todas as leituras. A estabilidade temporal ocorre quando se observam pequenas variações nas Diferenças Relativas entre as posições espaciais no intervalo de tempo (Equação 10).

$$DR_{ij}(\theta) = \frac{(\theta_{ij} - \bar{\theta}_j)}{\bar{\theta}_j} \times 100 \quad (\text{Equação 10})$$

sendo:

DR_{ij} = diferença relativa para um local i no tempo j ;

θ_{ij} = valor do conteúdo de água no solo no local i e no tempo j ;

$\bar{\theta}_j$ = valor médio do conteúdo de água no solo todas as posições, no momento j .

Os autores Monte-Mor et al. (2012) explicam que valores de DR próximos a zero indicam locais que possuem uma média de umidade próxima da média da área, enquanto valores de DR maiores ou menores que zero indicam, respectivamente, uma superestimativa ou subestimativa em relação à média da umidade na área de estudo.

A média da diferença relativa para cada locação é definida pela Equação 11:

$$\overline{DR}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta_{ij} \quad (\text{Equação 11})$$

Sendo:

m = o número de leituras realizadas.

Para o desvio padrão temporal de cada locação, considera-se a Equação 12:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\delta_{ij} - \bar{\delta}_j)^2} \quad (\text{Equação 12})$$

O grau de correlação foi avaliado tomando-se por base o erro aleatório, o qual indica o nível de dispersão dos dados obtidos em relação à média. A precisão da análise está relacionada à semelhança entre os valores do sensor estável e a média nos demais sensores.

Matematicamente, a similaridade pode ser analisada através do índice de concordância (d) (Willmott et al., 2012), dado pela Equação 13:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{y}'_i| + |y'_i|)^2} \quad (\text{Equação 13})$$

em que,

d = adimensional (variando de zero, para nenhuma concordância, a 1, para concordância perfeita).

E y'_i e $\hat{y}'_i$ estão descritos na Equação 14 e 15, respectivamente.

$$y'_i = y_i - \bar{y} \quad (\text{Equação 14})$$

$$\hat{y}'_i = \hat{y}_i - \bar{y} \quad (\text{Equação 15})$$

Sendo,

$\hat{y}_i$ = valor no sensor estável;

y_i = valor médio nos demais sensores no tempo e

$\bar{y}$ = média dos valores de todos os sensores no tempo.

Os gráficos foram elaborados após a identificação dos pontos que combinavam a estabilidade temporal para confirmar o comportamento do ponto escolhido durante o tempo de avaliação e comparar os valores dos pontos com a média geral, conforme Fontes Júnior et al. (2012).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Baseado no modelo de caracterização do solo de classes texturais (triângulo textural), é possível classificar a textura do solo como franco argilo siltoso, que apresenta 0,79% de areia total, 29,40% de argila e 69,81% de silte, a média da condutividade hidráulica (Ks) obtida pelo método Beerkan foi de 0,12 mm.s⁻¹(±0,33).

Tabela 14 - Estatística descritiva dos parâmetros físicos e hidráulicos do solo da área experimental na camada superficial.

Estatística Descritiva	Ks (mm.s ⁻¹)	Areia	Argila	Silte	φ _t
	(n = 48)	(g.kg ⁻¹) (n = 24)			(n = 48)
1ª Quartil	0,031	7,16	244,4	646,5	0,51
Média	0,12	7,98	296,3	703,7	0,54
Mediana	0,038	7,94	301,5	698,5	0,55
3ª Quartil	0,07	9,01	353,5	755,6	0,58
Desvio Padrão	0,33	1,38	57,7	57,7	0,054

Ks = condutividade hidráulica; φ_t = porosidade total.

A porcentagem de superfície coberta pela vegetação disponível foi igual a 88,70%, obtendo-se 11,29% de área exposta (Figura 37). Ainda que a cobertura auxilie na redução da evapotranspiração, na preservação e retenção de água no solo (MONTENEGRO et al., 2013), a necessidade de pré-trituração do material que será utilizado como cobertura do solo é ressaltada por Araújo et al. (2019), pois isso evitará que as folhas acumulem parte significativa da água em suas estruturas, limitando a quantidade de água que infiltra no solo.

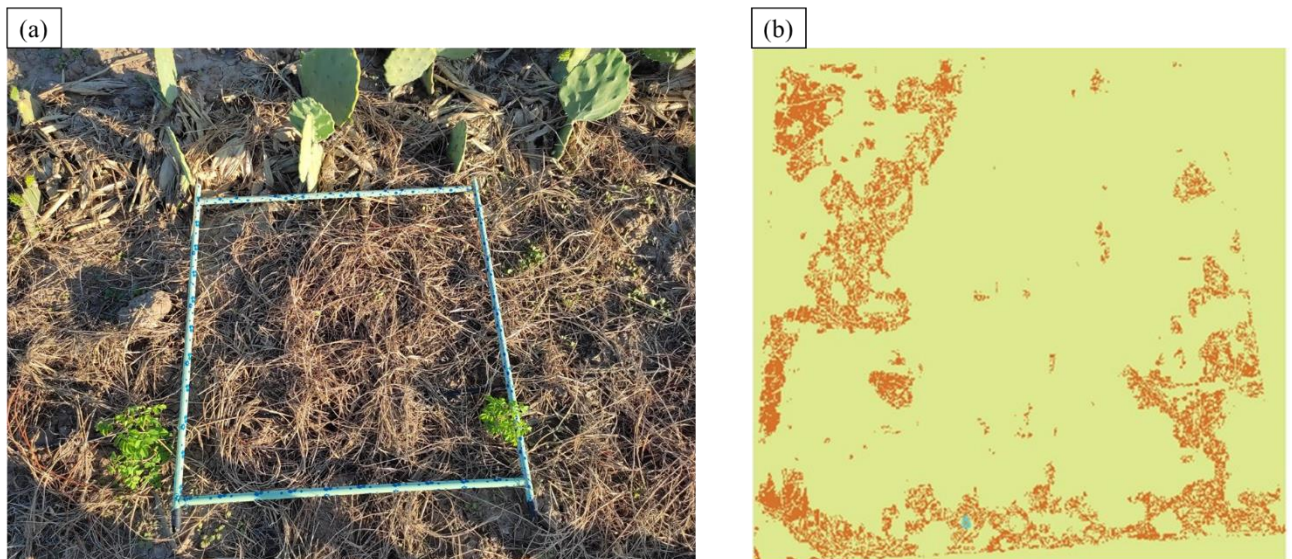


Figura 37 - (a) Área determinada por moldura de 1m² para avaliação da área coberta; (b) análise realizada no software QGIS.

Os coeficientes de variação (CV) da umidade indicaram média variabilidade, segundo Warrick & Nielsen (1980), que classificam variação média para valores de CV entre 12% e

60%. Para o setor com cobertura, foi encontrado o valor de CV de 21.95% e no setor sem cobertura de 18.09%. Araújo et al. (2019) encontraram o valor médio do CV foi de 24,51% ($\pm 1,23$) para o solo desnudo, enquanto no setor coberto com folha de bananeira, a variação média dos pontos de monitoramento foi de 39,86% ($\pm 2,54\%$). Os autores ressaltaram que a maior oscilação no setor coberto se deve à geometria da palha da bananeira interferir na distribuição da água ao longo das avaliações, implicando que as folhas interceptaram parte da água dos aspersores.

Para um estudo de estabilidade temporal da umidade em um cultivo de palma forrageira, Carvalho et al. (2017) utilizaram a sonda capacitiva modelo Diviner 2000® para as suas medições, encontrando normalidade dos dados apenas nas camadas 0,30-0,40 m e 0,50-0,60 m. De acordo com a categorização do CV constataram uma variabilidade média dos dados.

A Tabela 15 apresenta os resultados de estatística descritiva temporal para umidade do solo, nos dois setores (com e sem cobertura), durante as 31 leituras. Com exceção da L1 (8 h), a média da umidade de todas as leituras do setor com cobertura foram maiores do que a do setor sem cobertura. Resultado semelhante foi encontrando por Souza et al. (2011), em cultivo de cenoura, que possuía tratamentos com ausência e presença de cobertura de solo, e observaram maiores teores de umidade do solo no setor com cobertura.

Tabela 15 - Estatística descritiva temporal dos dados da leitura do sensor (%) coletados com FALKER HidroFarm, com e sem cobertura morta.

Setor													
Com cobertura								Sem cobertura					
		$\bar{X}$	Median a	Min	Max	DP.	CV (%)	$\bar{X}$	Median a	Min	Max	DP.	CV (%)
L1	08:00	48,47	47,80	32,40	60,00	10,69	22,05	49,07	51,65	38,10	58,80	7,88	16,06
L2	10:00	51,15	57,05	32,20	60,00	11,42	22,33	44,92	45,60	35,90	51,90	6,74	15,01
L3	12:00	51,28	56,00	32,80	60,00	11,17	21,78	45,62	46,45	38,20	52,70	6,90	15,14
L4	14:00	50,08	52,75	32,40	60,00	11,23	22,42	47,98	47,80	40,80	57,00	6,61	13,77
L5	16:00	50,08	52,75	32,40	60,00	11,23	22,42	47,98	47,80	40,80	57,00	6,61	13,77
L6	08:00	47,60	50,90	31,30	57,00	10,51	22,08	44,85	45,30	35,90	51,80	6,66	14,86
L7	10:00	49,68	52,70	33,30	60,00	10,34	20,82	42,73	43,10	36,00	49,60	5,49	12,85
L8	12:00	51,27	54,55	33,80	60,00	10,51	20,49	47,15	48,15	40,20	53,80	5,73	12,15
L9	14:00	48,1	52,20	30,6	57,4	11,1	23,1	43,1	43,35	36,9	50,7	5,4	12,7

	0	2		0	0	4	5	7		0	0	8	1
L1	16:0	50,6	53,45	31,3	60,0	10,9	21,5	44,6	44,95	36,2	54,9	6,2	14,0
0	0	5		0	0	0	2	3		0	0	8	6
L1	08:0	48,2	51,45	31,1	59,1	11,1	23,0	41,7	41,75	35,1	49,6	5,2	12,4
1	0	5		0	0	2	5	7		0	0	1	7
L1	10:0	47,3	49,80	30,2	60,0	11,3	23,8	42,3	43,45	33,5	51,5	6,4	15,2
2	0	8		0	0	1	6	3		0	0	6	7
L1	12:0	45,7	48,80	28,9	55,5	11,0	24,1	40,8	41,35	32,1	49,5	5,9	14,6
3	0	0		0	0	4	6	2		0	0	6	1
L1	14:0	45,8	49,40	30,0	56,4	10,7	23,4	40,8	41,75	33,1	47,7	5,5	13,4
4	0	5		0	0	3	1	5		0	0	0	7
L1	16:0	45,7	48,80	29,5	57,6	10,7	23,5	41,8	42,35	33,0	52,3	6,6	15,9
5	0	0		0	0	7	8	7		0	0	7	3
L1	08:0	48,2	51,50	30,6	60,0	11,6	24,0	41,2	41,95	31,4	50,4	6,4	15,7
6	0	2		0	0	2	9	8		0	0	9	1
L1	10:0	46,6	50,40	30,2	56,0	10,5	22,6	41,7	43,15	31,1	51,3	6,8	16,3
7	0	5		0	0	5	1	8		0	0	5	9
L1	12:0	44,8	49,35	29,9	55,4	10,8	24,2	40,5	39,80	33,7	48,7	5,5	13,6
8	0	7		0	0	6	0	8		0	0	2	0
L1	14:0	45,1	48,25	29,8	57,2	10,4	23,0	41,2	41,05	31,4	50,4	7,1	17,2
9	0	2		0	0	2	9	0		0	0	1	6
L2	16:0	44,9	47,90	29,6	56,5	10,2	22,7	40,1	40,30	31,2	50,6	7,4	18,6
0	0	0		0	0	2	6	8		0	0	9	5
L2	08:0	41,6	44,85	27,4	55,2	10,4	25,0	38,9	41,05	26,6	49,8	8,9	23,0
1	0	5		0	0	4	6	3		0	0	9	9
L2	10:0	44,4	47,30	29,7	57,3	10,3	23,2	39,0	39,30	28,2	47,7	7,2	18,6
2	0	8		0	0	3	1	8		0	0	7	1
L2	12:0	44,1	48,10	30,2	53,4	9,67	21,8	39,1	39,05	28,6	48,6	7,1	18,1
3	0	7		0	0		9	8		0	0	1	3
L2	14:0	44,5	47,35	30,0	56,4	9,84	22,1	39,4	39,85	29,9	48,8	7,3	18,5
4	0	2		0	0		0	3		0	0	3	9
L2	16:0	43,8	46,10	29,1	58,0	10,7	24,5	39,4	39,95	27,6	49,2	7,7	19,6
5	0	2		0	0	4	2	2		0	0	5	5
L2	08:0	41,6	44,85	27,4	55,2	10,4	25,0	38,9	41,05	26,6	49,8	8,9	23,0
6	0	5		0	0	4	6	3		0	0	9	9
L2	08:0	45,6	47,20	32,1	60,0	9,87	21,6	36,3	35,70	25,1	47,2	8,4	23,1
7	0	5		0	0		1	2		0	0	2	7
L2	10:0	41,7	43,75	27,9	55,3	9,81	23,4	33,4	31,10	24,1	46,2	8,4	25,3
8	0	5		0	0		9	3		0	0	8	6
L2	12:0	42,4	44,40	30,0	54,9	9,43	22,2	35,8	35,10	23,9	47,5	9,4	26,2
9	0	2		0	0		4	0		0	0	1	9
L3	14:0	43,3	44,70	30,0	58,9	10,6	24,4	36,8	37,35	23,9	52,2	9,8	26,7
0	0	3		0	0	0	5	5		0	0	7	7
L3	16:0	43,8	46,10	29,1	58,0	10,7	24,5	39,4	39,95	27,6	49,2	7,7	19,6
1	0	2		0	0	4	2	2		0	0	5	5

$\bar{X}$ = média; Mín = Mínimo; Max = Máximo; DP. = Desvio padrão; CV = Coeficiente de variação.

Os dados apresentaram normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de significância nos dois setores e em todas as leituras, o que pode ser constatado também por sua média e mediana serem próximas. As médias dos dados do setor com cobertura ficaram aproximadamente 46,40% ($\pm 10,18$) e as médias do setor sem cobertura 41,53% ($\pm 7,52$). De

forma geral, observa-se no comportamento de cada sensor, que o setor que possui cobertura manteve-se mais úmido, enquanto nos sensores posicionados no transecto sem cobertura ocorreu um decréscimo de leitura (Figura 38).

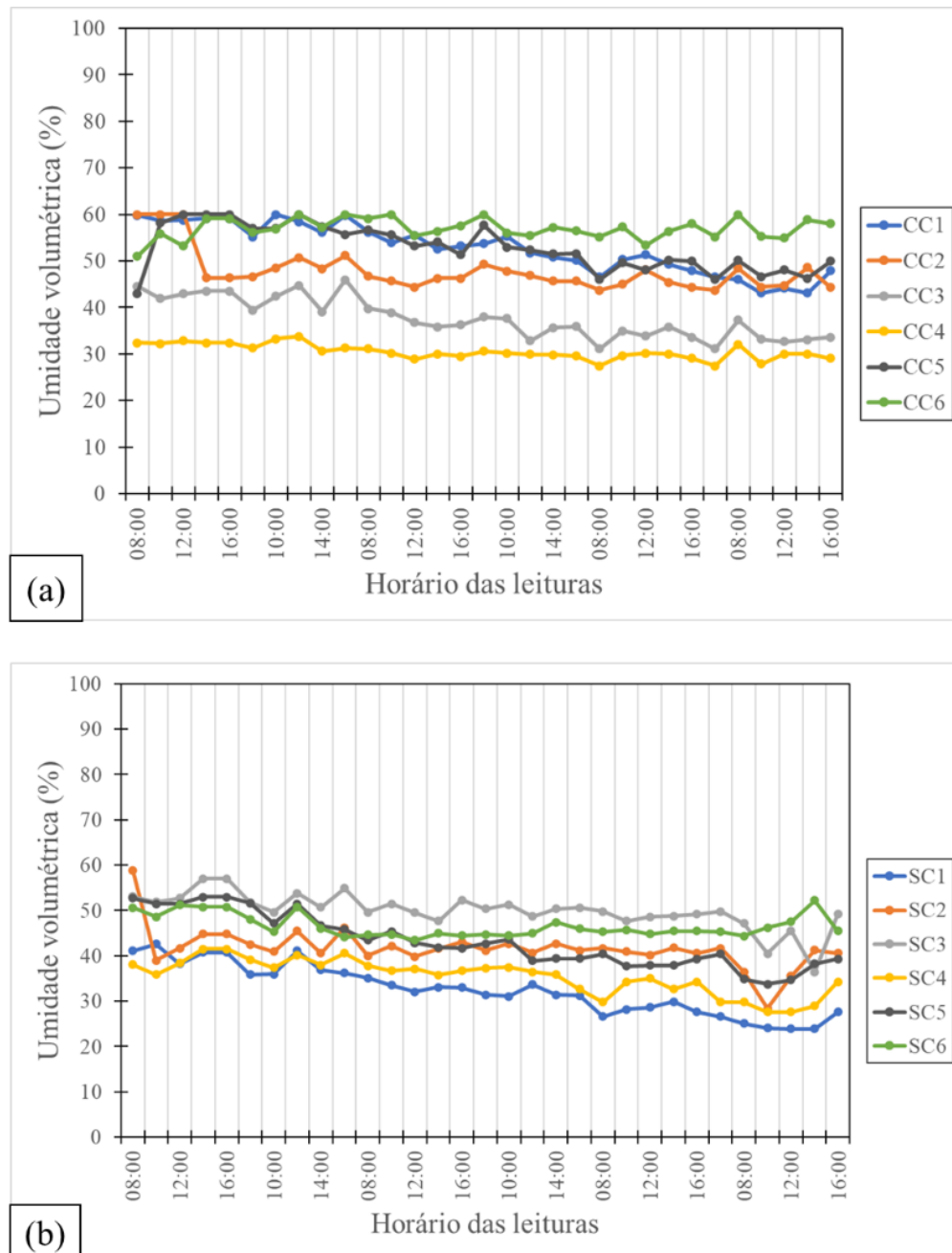


Figura 38 - Comparação entre as medições dos sensores em diferentes pontos e horários, nos setores com (a) cobertura morta (CC) e (b) sem cobertura (SC). Nomes dos sensores: CC1, CC2, CC3, CC4, CC5, CC6, SC1, SC2, SC3, SC4, SC5 e SC6.

No que diz respeito à estabilidade temporal, a Figura 39 apresenta as diferenças relativas e os respectivos desvios-padrão, para os setores com e sem cobertura. Esses dados

permitem avaliar quais estações de monitoramento estão mais próximas da umidade média geral na região de estudo e podem ser usados como referência amostral. (MELO FILHO & LIBARDI, 2005; SOUZA et al., 2011). Na área com cobertura, o ponto de medição que apresentou a DR mais próxima de zero foi o CC2, com valor de 2,39 ($\pm 7,92\%$). Para o setor sem cobertura, o ponto mais representativo foi o SC2, com DR de 0,2 ($\pm 6,95\%$). No estudo de Araújo et al. (2019), a área sem cobertura apresentou a DR mínima de 2,40 ($\pm 2,54\%$).

O DR permite localizar os locais mais estáveis, assim como os pontos amostrais que subestimam ou superestimam a umidade. Neste caso, os pontos que mais se afastaram da média da umidade foram o CC4, CC6, com valores de DR e desvio padrão de -34,71 ($\pm 3,32\%$), 26,86 ($\pm 17,13\%$), respectivamente, para os setores com e sem cobertura. Em futuras medições desta variável dentro da área de estudo, não devem ser sugeridos pontos que subestimam ou superestimam a umidade (CARVALHO et al. 2017).

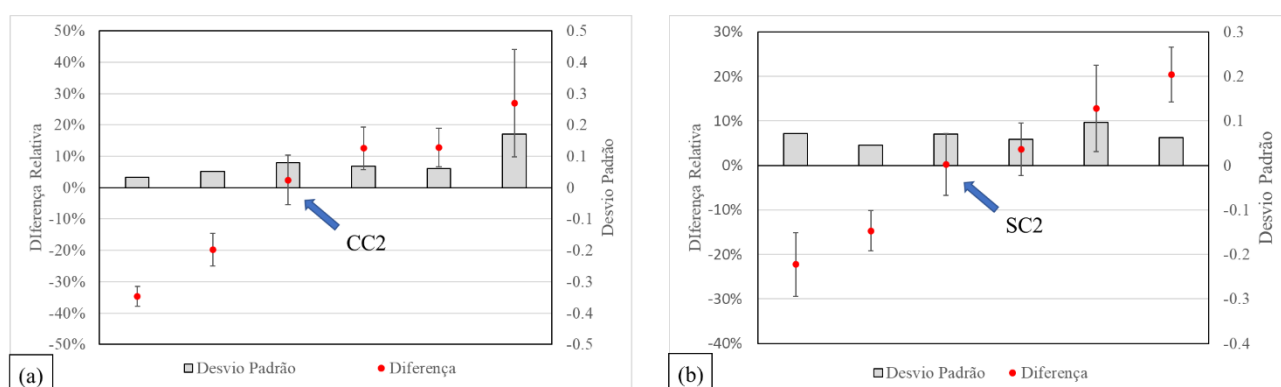


Figura 39 - Diferença relativa média e desvio-padrão para a umidade do solo nos setores com (a) e sem cobertura morta (b). Valores em destaque indicam os pontos que mais se aproximaram.

Ao avaliar a estabilidade temporal em cultivo de cenoura com e sem cobertura morta, Souza et al. (2011) encontraram valores de DR de 0,21($\pm 3,69\%$) para o setor com cobertura e -0,28 ($\pm 2,86\%$) para o setor sem cobertura. Os pontos que mais subestimaram ou superestimaram a média da umidade, onde valores mais discrepantes de DR, apresentaram médias de -32,55 ($\pm 16,90\%$) e 17,64 ($\pm 4,67\%$), no setor que não recebeu o resíduo, diferente do que foi encontrado nesse estudo, onde os valores mais discrepantes foram nos sensores que receberam cobertura de solo.

Para validar os resultados pela técnica da diferença relativa, foram gerados gráficos (Figura 40) com o ponto que apresentou o DR mais próximo de zero e o menor desvio padrão. O setor com cobertura apresentou uma umidade média (46,39%), similar ao ponto

identificado como mais estável ao longo do tempo (47,86%). Já o trecho sem cobertura apresentou valores mais próximos, sendo a média geral 41,53% e a do ponto mais estável (41,58%), indicando que a metodologia proposta por Vachaud et al. (1985) pode ser utilizada na área.

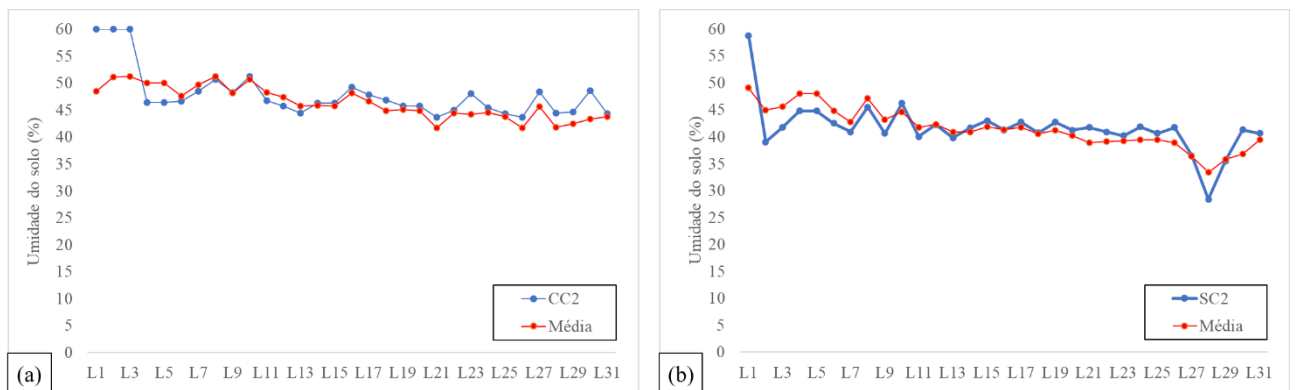


Figura 40 - Comparação entre os valores médios da leitura dos sensores no solo e os valores de umidade nas posições com estabilidade temporal, nos setores com (a) e sem cobertura (b).

No manejo da irrigação, encontrar um ponto de monitoramento estável ao longo do tempo é fundamental. Como resultado, ponto do sensor SC2, no setor sem cobertura, foi identificado como estável temporalmente, podendo vir a ser utilizado como referência para coleta de dados de umidade na área. Dessa forma, reduz-se o tempo de monitoramento e evita-se gastos com a manutenção dos outros sensores.

Para as calibrações do sensor, os gráficos de dispersão foram elaborados com uma linha de tendência linear ligando a umidade, referente às metodologias apresentadas, e as leituras de umidade do sensor relacionado (%). Desta forma obtém-se as curvas de calibração do sensor para as variadas condições.

Em relação a calibração com amostras de perfis de solo não deformadas, o método não apresentou sucesso, pois não foi possível saturar o solo por capilaridade. Sua superfície apresentou uma camada branca, provavelmente sais (Figura 41).

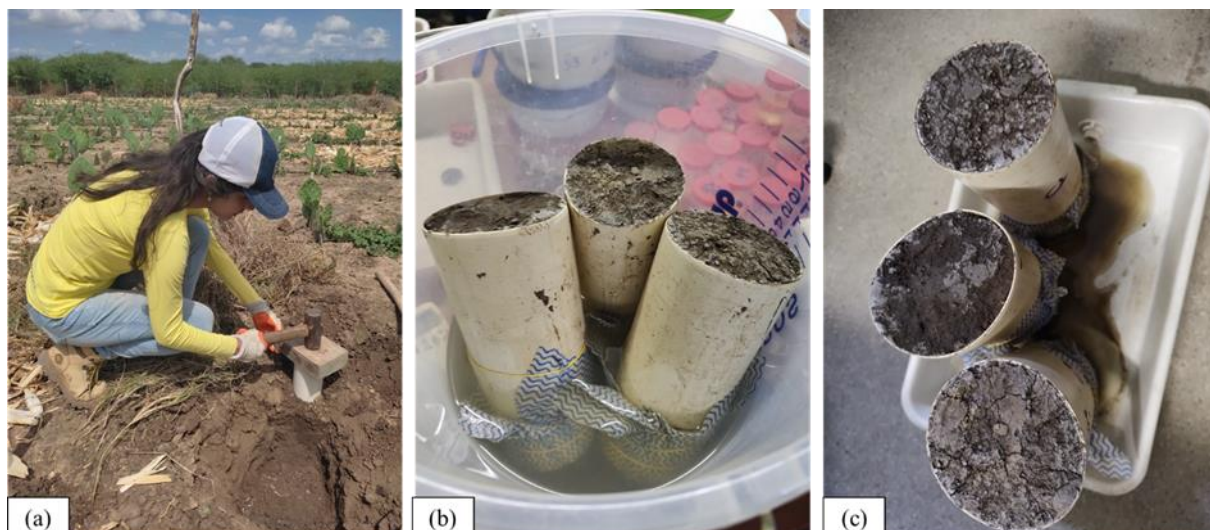


Figura 41 - (a) coleta da amostra não deformada para calibração; (b) tentativa de saturação por capilaridade; (c) camada branca em cima do perfil.

A calibração com amostras deformadas, na qual foram saturadas por capilaridade, o sensor apresentava a informação no visor “ERRO DE POSIÇÃO”. Além da luz infravermelha, o sistema também foi submetido à luz solar, porém a drenagem acontecia de forma lenta e o sensor continuava fornecendo a mesma informação. Quando a umidade do solo era elevada, o sensor apresentava a informação no visor “ERRO DE POSIÇÃO” (Figura 42).

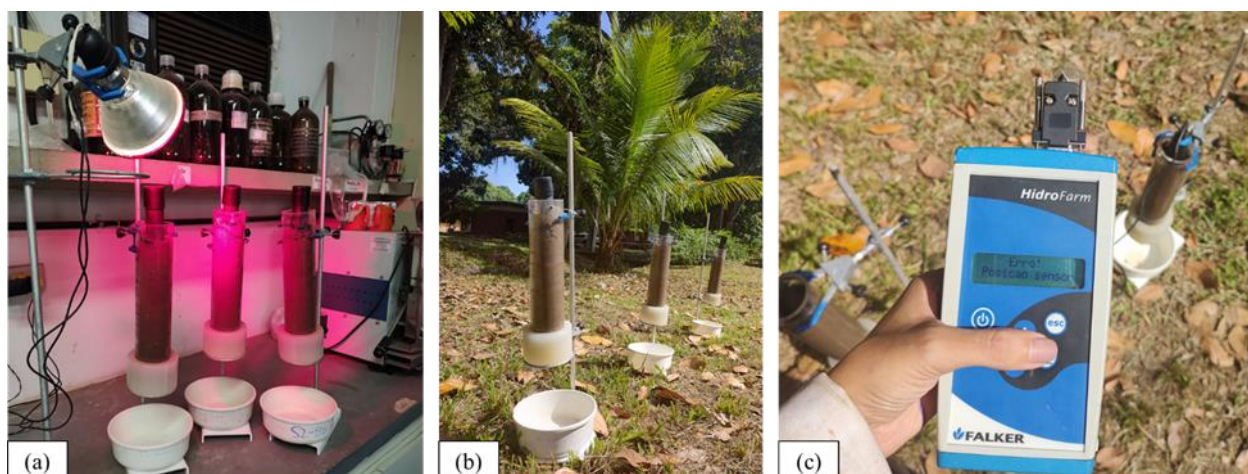


Figura 42 - (a) colunas de acrílico na luz infravermelha; (b) colunas de acrílico para secar ao ar; (c) leitura no sensor mostrando erro de posição do sensor.

Todas as amostras exibiram "Erro de Posição" em suas medições, indicando que o nível de umidade está acima do limite de 60% para a metodologia proposta por Matula et al. (2016) (Figura 43). Diante desse problema na drenagem do teor de água do solo empregado, uma nova metodologia teve que ser utilizada ao longo da implementação do experimento.

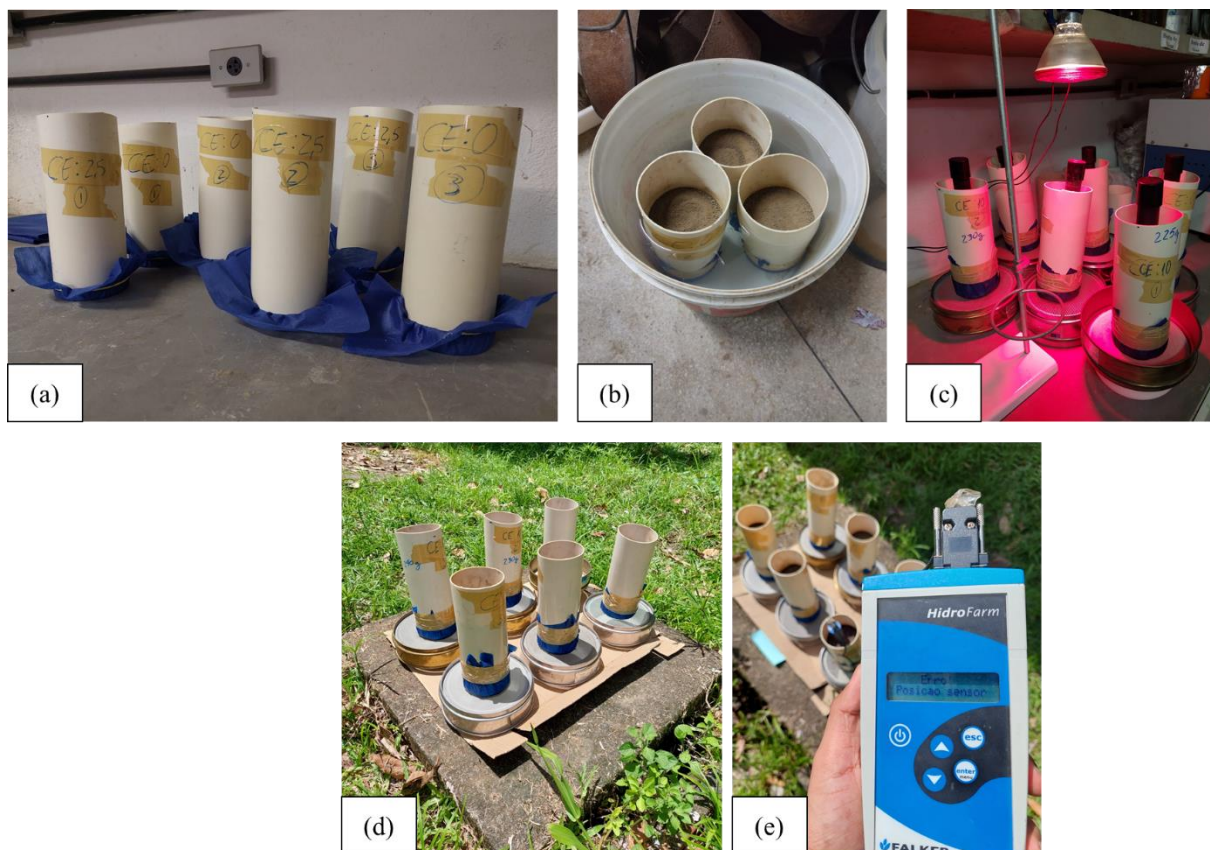


Figura 43 - Calibração adaptada de Matula et al. (2016). (a) Tubos de PVC para diferentes salinidades; (b) saturação dos solos por capilaridade; (c) amostras submetidas à luz infravermelha; (d) amostras submetidas a luz solar; (e) Leituras sendo realizadas.

Em relação à calibração *in situ*, o R^2 apresentou-se baixo (0,3238), como pode ser observado no gráfico (Figura 44), e quando se aumenta a quantidade de pontos, o coeficiente de determinação também foi reduzido (0,0285). O coeficiente R^2 deve estar próximo da unidade para ser usado com sucesso na calibração. Foram plotadas curvas de calibração com R^2 próximo à unidade para a metodologia apresentada por Rodrigues (2016) (Figura 45).

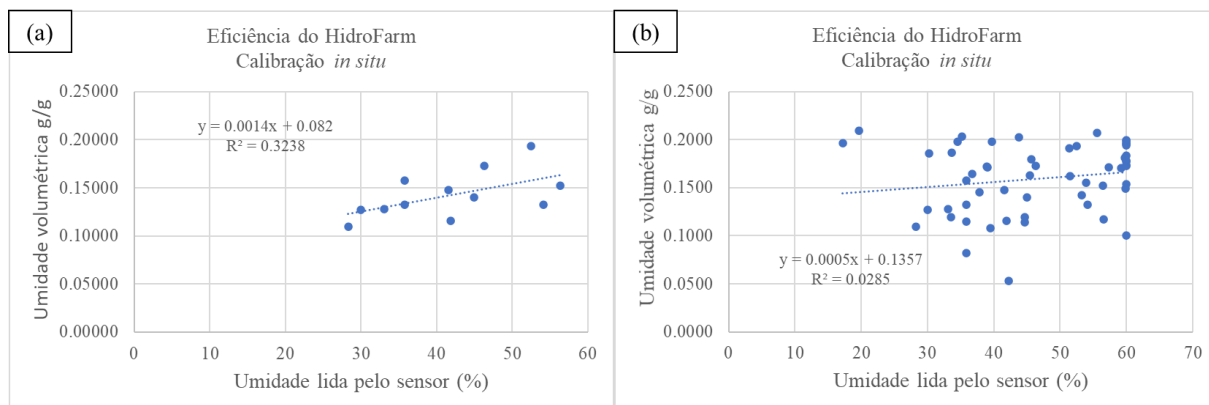


Figura 44 - (a) ajuste de curva da calibração *in situ* com doze pontos; (b) ajuste de curva da calibração *in situ* para 55 pontos.

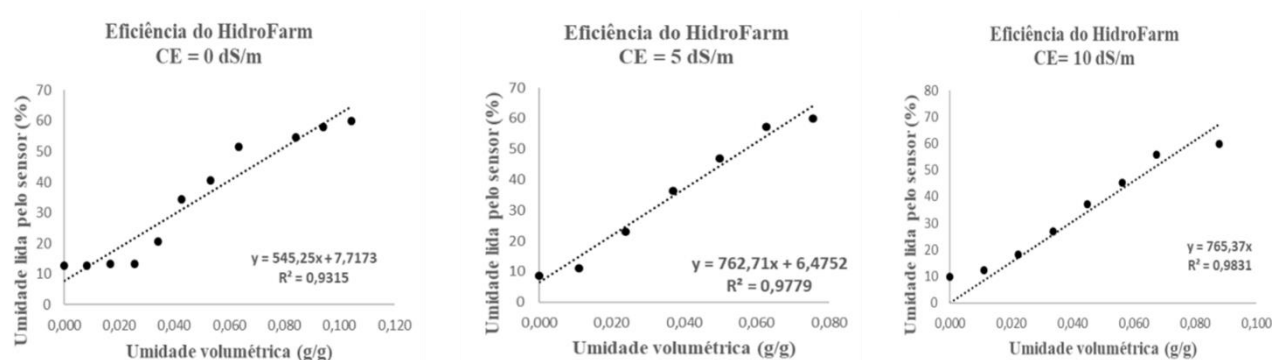


Figura 45 - ajuste de curva da calibração em laboratório, umidade volumétrica calculada ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) x umidade do sensor (%).

Pelos tubos de acrílico utilizado para calibração, pode-se visualizar a percolação da água. Foi possível verificar que o solo em questão não possibilitou drenar todo o volume de água presente em seus poros, permanecendo a umidade até a metade da coluna mesmo após 24 horas da última aplicação da lâmina de água (Figura 46).



Figura 46 - Após 24 horas da última aplicação da solução, a coluna de solo foi umidificada com solução $CE = 5 \text{ dS.m}^{-1}$.

A metodologia proposta por Rodrigues (2016) foi a mais eficaz para esse estudo, porém recomenda-se a utilização de outro sensor na área, devido a dificuldade do solo em drenar a água aplicada. Com início da irrigação após esse estudo, seria interessante calibrar os sensores de umidade com água que possui condutividade elétrica próxima a da utilizada para irrigação.

Os dados de umidade, para a área que possui os 6 tratamentos, em duas profundidades (0,00 – 0,05 m e 0,05 – 0,10 m), foram submetidos à estatística descritiva e apresentaram normalidade dos dados a 5% de significância, através do teste de Kolmogorov-Smirnov, e seu CV foi classificado como média variabilidade dos dados (Tabela 12).

Nesse estudo não analisou a interferência dos consórcios eles tinham sido implementados na área a pouco tempo, o que pode ser observado no capítulo II, Tabela 4.

Tabela 16 - Estatística descritivas diferentes tratamentos e profundidades

Tratamentos	Média	Mediana	D.P	C.V (%)
CCM 0.00-0.05	0.17	0.17	0.06	33.78
CCM 0.05-0.10	0.20	0.21	0.05	24.86
SCM 0.00-0.05	0.07	0.07	0.03	41.18
SCM 0.05-0.10	0.13	0.13	0.03	27.17

Os dados de umidade para as duas camadas apresentaram relação linear com coeficiente de determinação igual 85% para a primeira camada e 79% para a segunda camada.

A aplicação de métodos de conservação, em particular o uso de cobertura morta no solo, aumenta a umidade do solo, pois essas atividades permitem que a água permaneça em contato com o solo por mais tempo, entrando de acordo com o que foi discutido por Montenegro et al. (2020).

4 CONCLUSÕES

A metodologia de diferenças relativas mostrou-se eficiente para detectar locais de amostragem com estabilidade temporal, tanto em área com cobertura morta, quanto na ausência de cobertura, demonstrando a relevância de empregar a técnica para otimizar custos associados à instalação de equipamentos e tempo de monitoramento.

A utilização de sensores FALKER HidroFarm deve ser calibrado para tipo de solo, e diferentes condições de salinidade, para possibilitar um adequado manejo da irrigação e controle da umidade do solo.

REFERÊNCIAS

ALVES, C. P. et al. Consórcio palma-sorgo sob lâminas de irrigação: balanço de água no solo e coeficientes da cultura. **Agrometeoros**, v. 27, n. 2, p. 347–356, 2020.

AMORIM, D. M. et al. Fenofases e momento de corte de palma forrageira sob irrigação e sistemas de plantio. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, v. 47, n. 1, p. 62–71, 2017.

ANDRADE, T. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; RODRIGUES, D. F. B. Variabilidade espaço-temporal da condutividade elétrica da água subterrânea na região semiárida de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, (16), p. 496–504, 2012.

ARAÚJO, D. C. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, D. P. S.; RODRIGUES, R. A. S. Temporal stability of soil moisture in banana cropping area in the Brazilian semiarid region. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 11, p. 852-859, 2019.

BERTONI, J. & NETO, F. L. Conservação do Solo. São Paulo: Editora Ícone, 9ª Edição, 355p., 2014.

CAMARGO, F. J. A.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, p. 89-97, 1997.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. K.; NOVAK, J. M.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, 58, pp. 1501–1511, 1994.

CAMPOS, F. S. et al. Alternativa de forragem para caprinos e ovinos criados no semiárido. **Nutritime Revista Eletrônica**, v. 14, n. Abril, p. 5004–5013, 2017.

CARVALHO, A. A.; SILVA, T. G. F.; QUEIROZ, M. G.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; JARDIM, A. M. R. F.; SOUZA, C. A. A. Estabilidade temporal e variabilidade espacial da umidade de um argissolo cultivado com palma forrageira. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 7, p. 1998-2009, 2017.

DI PIAZZA, A.; CONTI, F.L.; NOTO, L.V.; VIOLA, F.; LA LOGGIA, G. Comparative analysis of different techniques for spatial interpolation of rainfall data to create a serially complete monthly time series of precipitation for Sicily, Italy. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.13, p. 396 – 408, 2011.

FONTES JÚNIOR, R. V. P.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, T. E. M. Estabilidade temporal da potenciometria e da salinidade em vale aluvial no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 11, p. 1188-1197, 2012.

GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; VIANA, J. deD. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 23, n. 5, p. 1149-1157, 2001.

HOAGLIN, D. C.; MOSTELLER, F.; TUKEY, J. W. Análise exploratória de dados: Técnicas robustas. Lisboa: Edições Salamandra. 1992. 446p.

LIMA, A. S. DE et al. Consumo hídrico e exigência térmica da palma forrageira em ambiente semiárido. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 110–128, 2021.

LINS, F. A. C.; LOPES, I.; MONTENEGRO, A. A. A. Variabilidade espacial da umidade e condutividade elétrica do solo em vale aluvial utilizando técnicas geofísicas. **Revista de Geociências do Nordeste**, v.6, n.1, p. 56-63, 2020.

LOPES, I.; MONTENEGRO, A. A. A. Spatialization of electrical conductivity and physical hydraulic parameters of soils under different uses in an alluvial valley. **Revista Caatinga**, v.32, p.222-233, 2019a.

LOPES, I.; MONTENEGRO, A. A. A.; de LIMA, J. L. M. P. Performance of conservation techniques for semiarid environments: Field observations with Caatinga, mulch and cactus forage palma. **Water**, v. 11, n. 792, 2019b.

MATULA, S.; BÁT'KOVÁ, K.; LEGESE, W. L. Laboratory performance of five selected soil moisture sensors applying factory and own calibration equations for two soil media of different bulk density and salinity levels. **Sensors**, v.16, 2016.

MELO FILHO, J. F.; LIBARDI, P. L. Estabilidade temporal de medidas do teor e do potencial mátrico da água no solo em uma transeção. **R. Bras. Ci. Solo**, 29:497-506, 2005.

MENEZES, J. A. L.; SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, J. R. L. Comportamento temporal da umidade do solo sob caatinga e solo descoberto na Bacia Experimental do Jatobá, Pernambuco. **Water Resources and Irrigation Management**, v.2, n.1, p. 45-51, 2013.

MENDONÇA, T. G.; BERÇA, A. S.; SOUZA, C. F. Uso da água em tomateiro cultivado com cobertura morta em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.13, n. 1, p. 3236-3246, 2019.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. Agricultura de Precisão. 1ª Edição, São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

MONTE-MOR, R. C. A.; PALMIER, L. R.; PINTO, E. J. A.; LIMA, J. E. S. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em uma bacia intermitente no semiárido de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 17 n.3, 101- 113, Jul/Set 2012.

MONTENEGRO, A. A. A.; ABRANTES, J. R. C. B.; de LIMA, J. L. M. P.; SINGH, V. P.; SANTOS, T. E. M. Impacto of mulching on soil and water dynamics under intermitente simulated rainfall. **Catena**, v. 109, p 139-149, 2013.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 30-37, 2006.

MONTENEGRO, A. A. A.; LOPES, I.; CARVALHO, A. A.; LIMA, J. L. M. P.; SOUZA, T. E. M. S.; ARAÚJO, H. L.; LINS, F. A. C.; ALMEIDA, T. A. B.; MONTENEGRO, H. C. L. A. Spatio Temporal Soil Moisture Dyna-mics and Runoff under Different Soil Cover Conditions in a Semiarid Representative Basin in Brazil. **Advances in Geosciences**, v. 48, p. 19–30, 2019.

MONTENEGRO, A. A. A.; LOPES, I.; ALMEIDA, T. A. B.; LIMA, J. L. M. P.; MONTENEGRO, H. G. L. A.; ARAÚJO, B. G. Impacto de métodos naturais para conservação de água e solo no semiárido brasileiro. **Revista FAVE – Ciências Agrárias**, v.19 (2), p. 45-59, 2020.

PINHEIRO, A. G., JARDIM, A. M. R. F., MONTENEGRO, A. A. A., SILVA, T. G. F., SILVA, J. R. I.; Characterization of alluvial soil hydrodynamics in the Upper Ipanema River Basin using the Beerkan Method,. **DYNA**, 88(218), p. 178-184, 2021.

RODRIGUES, R. A. S. **Geoestatística de atributos físicos e químicos do solo cultivado com milho irrigado por gotejamento no semiárido pernambucano. (Dissertação –**

Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, p. 111. 2016

SANTOS, D. P.; MONTENEGRO, A. A. A.; RODRIGUES, R. A. S.; ARAÚJO, D. C. S.; SANTOS, C. S.; CRUZ NETO, J. F. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em vale aluvial na região de Pernambuco. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 1, p. 2271-2281, 2018.

SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA JUNIOR, V. P.; SILVA, J. J. N. Efeito do manejo do solo na contenção do escoamento superficial no semiárido. In...: 6o. **Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Água de Chuva Belo Horizonte**, MG, 09-12 de julho de 2007.

SILVA JUNIOR, V. P.; MONTENEGRO, A. A. A.; MELO, R. O. Temporal stability of soil moisture in a experimental watershed in the Pernambuco semi-arid region. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.20, n.10, p. 880-885, 2016.

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

SOUZA, E. R.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G.; MATOS, J. A. Temporal stability of soil moisture in irrigated carrot crops in Northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, v.99, p.26-32, 2011.

VACHAUD, G.; SILANS, A. P.; BALABANIS, P.; VAUCLIN, M. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. **Soil Science Society of America Journal**, v.49, p.822-828, 1985.

VAUCLIN, M.; VIEIRA, S. R.; VACHAUD, G.; NIELSON, D. R. The Use of Cokriging with Limited Field Soil Observations1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 47 n. 2 , p. 175–184, 1983.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field In: Hillel, D. Applications of soil physics. New York: Academic, p. 319-344, 1980.

WILLMOTT, C. J.; ROBESON, S. M.; MATSUURA, K. A refined index of model performance. **International Journal of Climatology**, v. 32, p. 2088-2094, 2012.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO GERAL

- A metodologia Beerkan mostrou-se eficaz na determinação das características hidrodinâmicas do solo.
- A metodologia de diferenças relativas mostrou-se eficaz na detecção de locais de amostragem com estabilidade temporal, principalmente na falta de cobertura, destacando o valor do uso da técnica para reduzir gastos com instalação de equipamentos e monitoramento.
- A geoestatística foi utilizada para mapear a área de pesquisa, que é uma importante ferramenta para a tomada de decisões sobre o manejo do solo e dos recursos hídricos.
- Em termos das variáveis ECO e CE como possíveis indicadores da qualidade do solo, fica claro com este estudo que a mata ciliar tem uma qualidade superior, pois apresenta menor salinidade e maior teor de ECO, em comparação com a região onde a palma forrageira é cultivada.
- Pesquisas futuras poderão contribuir para um melhor entendimento da relação entre condutividade hidráulica e manejo do solo, tendo em vista que esta dissertação servirá como um estudo preliminar sobre a variabilidade espaço-temporal das variáveis analisadas a fim de utilizar abordagens conservacionistas que auxiliem na melhoria da convivência no semiárido.