



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



GISELLE DA CRUZ DE ALMEIDA

REÚSO DE ÁGUA E COBERTURA MORTA NO CULTIVO DE FORRAGEIRAS
CONSORCIADAS NO AGRESTE PERNAMBUCANO

RECIFE, PE

2024



GISELLE DA CRUZ DE ALMEIDA

REÚSO DE ÁGUA E COBERTURA MORTA NO CULTIVO DE FORRAGEIRAS
CONSORCIADAS NO AGRESTE PERNAMBUCANO

Tese 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 Doutora em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro

Coorientador: Dr. Ailton Alves de Carvalho

RECIFE, PE

2024

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)

- A447 Almeida, Giselle da Cruz de Almeida
Reúso de água e cobertura morta no cultivo de forrageiras consorciadas no agreste pernambucano /
Giselle da Cruz de Almeida Almeida. - 2024.
145 f. : il.
- Orientador: Abelardo Antonio de Assuncao Montenegro.
Coorientador: Ailton Alves de Carvalho.
Inclui referências.
- Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola, Recife, 2024.
1. Palma forrageira. 2. Sorgo. 3. Esgoto tratado. 4. Lâminas de irrigação. 5. Cobertura morta. I.
Montenegro, Abelardo Antonio de Assuncao, orient. II. Carvalho, Ailton Alves de, coorient. III. Título



GISELLE DA CRUZ DE ALMEIDA

REÚSO DE ÁGUA E COBERTURA MORTA NO CULTIVO DE FORRAGEIRAS
CONSORCIADAS NO AGRESTE PERNAMBUCANO

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

DEFENDIDA em ____/____/____

Banca Examinadora

Prof. Dr. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro – DEAGRI/UFRPE
Orientador

Prof. Dr. Alexsandro Oliveira da Silva
Examinador Interno

Dr. José Nildo Tabosa
Examinador Externo

Prof. Dr. Thieres George Freire da Silva
Examinador Externo

Prof. Dr. Ademir de Oliveira Ferreira
Examinador Externo



À minha vó Maria do Carmo Lisboa. A meus pais Edimar Caetano e Maria Francisca Lisboa. Meu irmão Eduardo Almeida. E minha companheira Maria Vitória.

Dedico



AGRADECIMENTOS

A Deus por me sustentar e cuidar de tudo.

Aos meus pais Maria Francisca Lisboa e Edimar Caetano por todo amor e cuidado.

Ao meu irmão Eduardo Almeida por todo carinho.

A minha vó Maria do Carmo por ser meu ponto de paz.

A minha companheira Maria Vitória por me apoiar incondicionalmente.

E as minhas amigas Raissa, Irene, Brenna, Carol e Catiana que me apoiaram tanto no início da pandemia, palavras não definem, mas o respeito, amor, persistência, acolhimento, resiliência, inspiração, generosidade, alegria e solidariedade que tiveram comigo, me marcaram para sempre.

A todos os amigos que Deus colocou na minha vida desde o início dessa caminhada: Joelma Maria, Ana Rosa, Daciane, Daci, Ruanna, Gabriela, Victoria, Wesley, Izabelly, Paula.

Aos meus melhores amigos e irmãos de coração Marcone Castro e Dayra Brandão.

Ao senhor Cícero, a dona Nida e a Marianne por todo o suporte

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEA).

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE, APQ - 0913- 5.03/15, 0414 – 5.03/20 e IBPG-1758-5.03/15), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) projetos universal 420.488/2018-9 e MAI DAI 403.622/2020-4, por todo apoio financeiro.

Ao Prof. Dr. Abelardo Montenegro por todo o conhecimento repassado, paciência e parceria.



Ao meu grande amigo Marcelo Silva. Minha primeira parceria de estudos durante o doutorado.

Ao meu amigo Gabriel Ítalo, por todo suporte durante a condução do experimento.

Aos amigos do Laboratório de Água e Solo (LAS) Thayná, Lizandra, Lucas, Lion, Rodrigo, Aline.

E a todas as pessoas que participaram direta e indiretamente do meu processo de formação pessoal e profissional.



“E nós sabemos que Deus
coopera em tudo para o bem
daqueles que o amam”

(Rm 8, 28)

ALMEIDA, G. C. Reúso De Água E Cobertura Morta No Cultivo De Forrageiras Consorciadas No Agreste Pernambucano. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.

RESUMO GERAL

Em decorrência da escassez em quantidade e qualidade dos recursos hídricos e aos fatores característicos do semiárido brasileiro, como os relacionados a baixas fertilidades dos solos, a produção de forragem na região apresenta limitações significativas. Na Região, a água disponível para irrigação geralmente contém quantidades elevadas de sais, além disso, a água disponível para consumo humano e para as práticas agrícolas tem sofrido grandes reduções, fazendo-se necessário buscar alternativas que garantam uma convivência produtiva com a escassez hídrica. Dessa forma, as hipóteses dessa pesquisa foram: i – a modelagem hidrológica permite adequada representação de processos hidrológicos em área cultivada com palma/sorgo, bem como a dinâmica de umidade e dos sais do solo submetido a irrigação com água residuária; ii – a utilização associadas de práticas conservacionistas (cobertura morta, reúso hidroagrícola, consórcio) incrementa o aporte de carbono orgânico, melhorando a qualidade dos solos e viabilizando a produção agrícola em locais que sofrem com escassez hídrica e risco de salinização. Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é avaliar as práticas conservacionistas a partir de dados *in situ* e modelagem hidrológica, visando a otimização de cultivo consorciado de palma e sorgo, considerando cenário atual e futuro. E como objetivos específicos: i - Investigar a variação do carbono orgânico, umidade do solo e condutividade elétrica do solo, bem como de índices biométricos em área de cultivo de palma e sorgo irrigado com água residuária e aplicação de cobertura morta; ii - Calibrar, validar e aplicar modelo numérico com base em dados coletados *in situ* para movimento de água e sais no solo irrigado com diferentes lâminas de água residuária e aplicação de cobertura morta. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados (DBC), com quatro repetições e empregado o esquema de parcelas subdivididas (3 x 2 m), as parcelas sendo as três lâminas de irrigação (80, 100, 120% da ET_c), e a cobertura morta (parcela com cobertura e parcela sem cobertura) sendo as subparcelas. As plantas de palma foram distribuídas a cada 0,2 m entre si e 1,0 m entre fileiras de plantio e as plantas de sorgo foram distribuídas entre as fileiras da palma, adotando-se um stand final de 12 plantas por metro linear. Além disso foi utilizada análise de variância, teste de média (Tukey - $p \leq 0,05$), análise de componentes principais e o modelo HYDRUS 1D para avaliação do comportamento das variáveis estudadas. As principais conclusões do trabalho foram: 1 - a irrigação com efluente doméstico tratado elevou a salinidade do solo. Todavia, foi verificado que a ocorrência de chuvas favoreceu a diminuição da salinidade do solo devido sua capacidade de lixiviação dos sais ao longo do perfil do solo. 2 - no atual cenário de mudanças climáticas, no aspecto de sustentabilidade, a melhor lâmina



recomendada para irrigação de sorgo consorciado com a palma forrageira em regiões semiáridas é a de 80% da ET_c com utilização de cobertura morta. 3 – a estimativa da umidade com o modelo HYDRUS-1D resultou em dados coerentes com os medidos em campo, apresentando elevada precisão, principalmente durante o período chuvoso. 4 – a estimativa da salinidade do solo na condição sem cobertura morta foi superior em aproximadamente 45,63 e 37,84% quando comparada à salinidade na condição com cobertura morta, em ambas as camadas analisadas.

Palavras-chave: Palma forrageira; Sorgo; esgoto tratado; lâminas de irrigação; cobertura morta

ABSTRACT

Due to the scarcity in quantity and quality of water resources and the characteristic factors of the Brazilian semiarid region, such as low soil fertility, forage production in the region faces significant limitations. Water available for irrigation in the region generally contains high levels of salts, and the water available for human consumption and agricultural practices has been greatly reduced, requiring the search for alternatives to ensure productive coexistence with water scarcity. Therefore, the hypotheses of this research were: i - hydrological modeling allows adequate representation of hydrological processes in areas cultivated with palm/sorghum, as well as the dynamics of soil moisture and salts under irrigation with wastewater; ii - the associated use of conservation practices (mulching, hydro-agricultural reuse, intercropping) increases the input of organic carbon, improving soil quality and enabling agricultural production in areas affected by water scarcity and risk of salinization. In this context, the objective of this study is to evaluate conservation practices based on in situ data and hydrological modeling, aiming to optimize the intercropping of palm and sorghum considering current and future scenarios. The specific objectives are: i - Investigate the variation of organic carbon, soil moisture, electrical conductivity, and biometric indices in areas of palm and sorghum cultivation irrigated with wastewater and mulching application; ii - Calibrate, validate, and apply a numerical model based on in situ data for water and salt movement in soil irrigated with different levels of wastewater and mulching application. The experimental design used was randomized complete blocks (RCB), with four replications, employing a split-plot scheme (3 x 2 m), where the plots were the three irrigation levels (80, 100, 120% of ET_c), and mulching (with mulching and without mulching) being the subplots. Palm plants were spaced 0.2 m apart and 1.0 m between rows, and sorghum plants were distributed between the rows of palm, with a final stand of 12 plants per linear meter. Analysis of variance, mean comparison test (Tukey - $p \leq 0.05$), principal component analysis, and the HYDRUS 1D model were used to evaluate the behavior of the studied variables. The main conclusions of the study were: 1 - Irrigation with treated domestic effluent increased soil salinity. However, it was observed that rainfall favored the decrease in soil salinity due to its leaching capacity along the soil profile. 2 - In the current scenario of climate change, in terms of sustainability, the recommended irrigation level for sorghum intercropped with forage palm in semiarid regions is 80% of ET_c with mulching. 3 - Soil moisture estimation with the Hydrus-1D model resulted in data consistent with field measurements, showing high accuracy, especially during the rainy season. 4 - Soil salinity estimation in the condition without mulching was approximately 45.63% and 37.84% higher compared to the condition with mulching, in both analyzed layers.

Keywords: Forage palm; Sorghum; Treated sewage; Irrigation depths; Mulching.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – Introdução Geral e Revisão de Literatura	14
1. Introdução.....	14
2. Hipóteses.....	16
3. Objetivos	16
3.1 Geral.....	16
3.2 Específico.....	16
4. Revisão de literatura	17
4.1 Importância da produção de forragem para o semiárido brasileiro	17
4.1.1. A cultura da palma.....	17
4.1.2. A cultura do sorgo	19
4.2 Produção de forragem frente ao cenário de mudanças climáticas	21
4.4 Reúso de água na irrigação	22
4.4.1. Reúso de água na agricultura: definições e aspectos legais.....	23
4.4.2. Forrageiras irrigadas com água residuária	25
4.5 Uso da cobertura morta em cultivos irrigados	26
4.6 Fortalecimento da caprinovinocultura através da produção de forragem com água residuária no Semiárido.....	28
4.7 Modelagem como ferramenta de gestão do solo e dos recursos hídricos.....	29
Referências bibliográficas	32
CAPÍTULO 2 – Estratégias Sustentáveis para Produção Agrícola no Semiárido Brasileiro: Análise do Consórcio Sorgo-Palma sob Irrigação com Efluente Tratado e Cobertura Morta.....	47
1. Introdução.....	49
2. Material e Métodos.....	52
2.1 Caracterização da área de estudo	52
2.2 Características das cultivares utilizadas.....	55
2.3 Delineamento experimental e tratamentos	56
2.4 Sistema e manejo de irrigação adotados	57
2.5 Avaliações relacionadas ao solo	58
2.6 Avaliações relacionadas às plantas.....	59
2.7 Análise dos dados	60

3. Resultados	61
3.1 Regime pluviométrico e manejo da irrigação.....	61
3.2 Avaliação da fração solo	63
3.3 Crescimento e produtividade das culturas.....	65
3.4 Análises de componentes principais (PCA's)	71
4. Discussão.....	80
4.1 Estudo hidrológico e controle da salinidade do solo.....	80
4.2 Desempenho das culturas em relação aos tratamentos aplicados	82
4.3 Influência dos tratamentos aplicados sobre as propriedades do solo e das plantas.....	84
4.4 Influência dos componentes hidrológicos sobre as propriedades do solo nos três cortes estudados	87
4.5 Análise comparativa do modelo determinístico (RLM) e do algoritmo de aprendizagem de máquina (RF) na estimativa do LAI do sorgo.....	88
5. Conclusões.....	88
Referências bibliográficas	89
CAPÍTULO 3 – Performance do HYDRUS-1D na simulação da umidade e sais do solo cultivado com palma e sorgo irrigado com esgoto tratado em cenários de mudanças climáticas no Semiárido brasileiro.....	
1. Introdução.....	103
2. Material e métodos	107
2.1 Caracterização da área de estudo	107
2.2 Caracterização do efluente doméstico tratado e usado na irrigação.....	110
2.3 Manejo da irrigação	110
2.4 Delineamento experimental e tratamentos	112
2.5 Monitoramento da umidade e condutividade elétrica do solo.....	113
2.6 Modelo Hydrus 1D.....	113
2.7 Avaliação do modelo	118
2.8 Modelagem Hydrus 1D considerando cenário de mudanças climáticas.....	118
3. Resultados	119
3.1 Comportamento das variáveis climáticas	119
3.2 Modelagem da umidade do solo – Hydrus 1D (irrigação < capacidade de campo).....	120
3.3 Modelagem da umidade do solo – Hydrus 1D (irrigação = capacidade de campo).....	122



3.4 Modelagem da umidade do solo – Hydrus 1D (irrigação > capacidade de campo).....	124
3.5 Modelagem da condutividade elétrica do solo – Hydrus 1D (irrigação = capacidade de campo)	126
3.6 Modelagem da umidade do solo – Hydrus 1D (cenário de mudança climática).....	128
4. Discussão.....	130
4.1 Influência da cobertura morta na dinâmica da umidade do solo	130
4.2 Influência da irrigação na dinâmica da umidade do solo	131
4.3 Influência da irrigação na dinâmica de sais do solo	133
4.4 Influência das alterações climáticas na dinâmica da umidade e salinidade elétrica do solo.....	134
5. Considerações finais	135
Referências bibliográficas	136



CAPÍTULO 1

Introdução Geral e Revisão de Literatura

CAPÍTULO 1 – Introdução Geral e Revisão de Literatura

1. Introdução

Devido às características inerentes ao semiárido brasileiro, como a alta variabilidade espaço-temporal das chuvas, baixos índices de precipitação, elevadas taxas de insolação e temperaturas, implica em elevadas taxas de evapotranspiração e déficit hídrico. Assim, alternativas de convivência com a seca tornam-se cada vez mais necessárias e urgentes, principalmente quando considerado o aumento crescente da população mundial e, com isso, a necessidade de se aumentar a produção de alimentos. Além disso, as projeções para as próximas décadas preveem um agravamento nesse cenário de escassez hídrica. Segundo Carvalho et al. (2020), a redução dos eventos de chuvas impactará na disponibilidade dos recursos hídricos.

Todavia, apesar das limitações, a Região Nordeste apresenta, nacionalmente, um forte destaque no setor pecuário, principalmente na produção de ovinos e caprinos. Entretanto, é importante ressaltar que o êxito do setor é dependente da disponibilidade de alimentos, tanto em quantidade quanto em qualidade, e que isso pode ser assegurado a partir da produção de forragens (Alves et al., 2016). Nesse sentido, algumas culturas se destacam, como a palma forrageira e o sorgo (Alves et al., 2019; Elamin et al., 2019; Jardim et al., 2020; Oresca et al., 2021).

Segundo Machado et al. (2017), medidas de convivência com a seca no semiárido baseiam-se na criação de possibilidades de uso sustentável dos recursos naturais, objetivando oferecer segurança hídrica para os usuários. Nesse sentido,

uma alternativa que vem sendo amplamente estudada é o reúso hidroagrícola, melhorando a convivência produtiva no semiárido (Somasundaram et al., 2019), evidenciados nas esferas social, econômica e ambiental (Garcia-Cuerva et al., 2016) e quando associado a práticas conservacionistas (Wang et al., 2020), apresenta muitos benefícios como manutenção da umidade do solo, aumento na capacidade de armazenamento de água, do controle de plantas invasoras (Martins et al., 2016; Salvador et al., 2019), além de melhorar as características físico-químicas e microbiológicas do solo, conforme Wells et al. (2019) que afirmaram que boas práticas de gestão podem aumentar o conteúdo de carbono orgânico e consequentemente a matéria orgânica do solo contribuindo positivamente para o incremento de carbono e nitrogênio do solo.

Para potencializar as vantagens associadas ao reúso hidroagrícola e a cobertura morta, ferramentas de manejo de baixo custo devem ser exploradas para melhorar a eficiência de todo o sistema. Para tanto, muito tem se investido em tecnologias de monitoramento, aplicáveis aos mais diferentes tipos de manejo, como a utilização de instrumentação para fins de armazenamento de dados (Vilela et al., 2015; Carvalho et al., 2021) e da modelagem matemática no estudo dos processos hidrológicos, como o caso de estudos utilizando o Modelo Hydrus cuja finalidade é simular a dinâmica da água e dos sais em perfis de solos (Li et al., 2014; Simunek et al., 2013; Silva et al., 2015; Simunek et al., 2018; Raki et al., 2021), subsidiando assim o planejamento e gestão dos recursos hídricos.

2. Hipóteses

A modelagem hidrológica permite adequada representação de processos hidroagrícolas em área cultivada com palma/sorgo, bem como a dinâmica de umidade e dos sais do solo submetido a irrigação com água residuária;

A utilização associadas de praticas conservacionistas (cobertura morta, reúso hidroagrícola, consórcio) incrementa o aporte de carbono orgânico, melhorando a qualidade dos solos e favorecendo o a produção agrícola em locais que sofrem com escassez hídrica e risco de salinização.

3. Objetivos

3.1 Geral

Avaliação do reúso de efluente associado a práticas conservacionistas a partir de experimentos in situ e modelagem hidrológica, visando a otimização de cultivo consorciado de palma e sorgo, considerando cenário atual e futuro.

3.2 Específico

- Investigar a variação do carbono orgânico, umidade do solo e condutividade elétrica do solo, bem como de índices biométricos em área de cultivo de palma e sorgo irrigado com água residuária e aplicação de cobertura morta;
- Calibrar, validar e aplicar modelo numérico com base em dados coletados in situ para movimento de água e sais no solo irrigado com diferentes lâminas de água residuária e aplicação de cobertura morta.

4. Revisão de literatura

4.1 Importância da produção de forragem para o semiárido brasileiro

A criação de ruminantes, principalmente os animais de pequeno porte, é uma das atividades socioeconômicas de maior relevância desenvolvida pelos produtores no semiárido brasileiro, estando muito relacionado a irregularidades das chuvas (Medeiros et al., 2023) e a sazonalidade da produção de forragem, resultando em uma produção deficitária de alimentos para estes animais, configurando-se assim como o maior desafio enfrentado pelos produtores da região (Santos et al., 2017).

Dentro dessa temática, muitas pesquisas voltadas à produção de forragem foram desenvolvidas na região semiárida (Santana et al., 2015; Carvalho et al., 2020; Santos et al., 2020; Carvalho et al., 2021), o que é considerado bastante positivo, sendo considerada uma excelente alternativa de convivência com a seca e viabilização da produção agrícola e pecuária na região. Pois, o uso de plantas forrageiras adaptadas às condições climáticas locais e que apresentem características nutricionais satisfatórias, incrementam o aporte forrageiro, principalmente nos períodos de escassez (Carvalho et al., 2017).

4.1.1. A cultura da palma

A palma forrageira é de origem mexicana e, atualmente, é possível encontrá-las em todos os continentes, exceto nas regiões polares. A palma forrageira pertence à Divisão Embryophyta, subdivisão Angiospermea, classe

Dicotyledoneae, subclasse Archiclamideae, ordem Opuntiales e família das Cactáceas, nesta família, existem 178 gêneros com cerca de 2.000 espécies conhecidas. As espécies de palma mais utilizadas como forrageiras pertencem aos gêneros *Opuntia* e *Nopalea* (Scheinvar, 2012). A palma forrageira transformou-se em uma das culturas mais rentáveis e produtivas na região semiárida brasileira, devido à estiagem que ocorreu entre os anos de 2012 e 2018, pelo fato de as suas características fisiológicas, anatômicas e estruturais auxiliarem na manutenção do seu potencial produtivo mesmo em áreas sob baixos índices pluviométricos (Rocha et al., 2017).

As plantas do gênero *Opuntia* possuem porte arborescente, eretas, largura de caule variando de 60 a 150 cm, cladódios ovalados com 30 a 60 cm de comprimento e sistema radicular superficial que em condições de seca se desenvolvem horizontalmente para absorver água em níveis mais baixos (Marques et al., 2017; Taiz et al., 2017).

Com relação à adaptabilidade, a palma forrageira adaptou-se bem as condições edafoclimáticas do semiárido, que tem como característica a baixa disponibilidade de água, consistindo em um fator limitante ao crescimento e desenvolvimento das plantas e seres vivos, de modo geral. Essa boa adaptabilidade se dá graças a estratégias de sobrevivência nesses ambientes, como as mudanças anatômicas, morfológicas, fisiológicas e bioquímicas (Alves et al., 2017). A palma forrageira é uma planta que possui o processo fotossintético conhecido como Metabolismo Ácido das Crassuláceas (CAM), que tem como característica alta eficiência no uso de água, em decorrência da fixação de CO₂

durante a noite e a transformação deste em biomassa pela luz do sol no período diurno (Ferraz et al., 2017; Souza et al., 2018).

Além de todas as vantagens já mencionadas, a importância da palma como reserva estratégica de forragem e na sustentabilidade da pecuária regional é visível, pois esta vem se apresentando como uma das principais forrageiras para manutenção dos sistemas de produção de leite no Agreste pernambucano, evidenciada por aproximadamente 88% dos produtores locais (Oliveira et al., 2016).

4.1.2. A cultura do sorgo

O Sorgo Sudão (*Sorghum sudanense*) é uma forrageira de origem africana, anual, precoce, com ótima capacidade de perfilhamento que se adaptou bem às condições do semiárido. Possui excelente qualidade nutritiva com folhas longas e abundantes, colmo fino e succulento, que podem chegar a três metros de altura, outra característica pertinente é sua elevada eficiência de uso de água conferindo a planta boa resistência à seca e ainda possui aptidão expressiva para produção de forragem, na forma de feno, silagem e pastejo (EMBRAPA, 2000). De acordo com Arennhardt et al. (2016), o sorgo destaca-se pela flexibilidade na época de plantio, com excelente potencial produtivo e forrageiro para nutrição animal, em especial, em períodos de escassez alimentar. Outras características que favorecem o cultivo dessa cultura é a capacidade de tolerância a solos com alta acidez e baixa fertilidade, além de boa resistência a doenças foliares e competitividade sobre ervas daninhas.

Quanto à fenologia das plantas, aspecto que se refere às fases de desenvolvimento, o que permite compreender a relação entre as características

morfológicas e fisiológicas, bem como os fatores do ambiente, especialmente os de ordem climática (Ventura et al., 2009). Conforme Von Pinho (2014), o ciclo do sorgo pode ser dividido em três fases: vegetativa, reprodutiva e período de maturação dos grãos. A etapa de crescimento EC1 é caracterizada pela germinação, aparecimento da plântula, crescimento das folhas e estabelecimento do sistema radicular fasciculado. A fase seguinte, EC2, inicia-se quando o meristema apical se diferencia em um meristema floral, e continua com o desenvolvimento da inflorescência até a antese. A terceira etapa, EC3, vai da floração à maturação fisiológica e senescência de parte das folhas.

Com relação ao manejo, em termos produtivos, a cultura admite até quatro cortes durante a estação de crescimento (Abusuwar, 2019). De acordo com Nascimento et al. (2020), o sorgo sudanense, quando comparado com outras culturas, apresenta maior produção de massa seca na parte aérea, característica desejável por ser parte comercializável. Carvalho et al. (2021), ao testar diversas lâminas de irrigação com água residuária no cultivo de sorgo, observaram que a cultura conseguiu superar os desafios e aumentar significativamente sua produção de massa seca, mesmo em condições de elevação da salinidade do solo, quando aplicada a cobertura morta.

Silva et al. (2023) investigaram como diferentes espaçamentos e orientações de plantio, adubação nitrogenada e consórcios influenciam a dinâmica da água no solo, a partição da evapotranspiração e os indicadores de uso da água em plantações de palma e consórcio palma-sorgo

4.2 Produção de forragem frente ao cenário de mudanças climáticas

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios para a agricultura e, conseqüentemente, para a produção de forragem. É importante considerar que esse tipo de produção desempenha um papel crucial na alimentação de animais, sendo uma fonte fundamental de nutrientes. Diante das transformações nos padrões climáticos, é crucial avaliar e adaptar as práticas de produção de forragem para garantir a sustentabilidade e a segurança alimentar (Reddy et al., 2023).

Os efeitos das alterações climáticas incluem desequilíbrios nos padrões de temperatura, vento e precipitação (Bahareh et al., 2016; Aainaa et al., 2019; Andrade et al., 2020; Gründemann et al., 2022), que ocasionalmente reduzem a quantidade e a qualidade das culturas forrageiras, levando ao estresse nutricional dos animais (Carvalho et al., 2017). Diante desse cenário, é imperativo adotar práticas agrícolas adaptativas. A seleção de variedades de plantas mais resistentes às mudanças climáticas, a implementação de sistemas de irrigação eficientes e a gestão sustentável do solo são estratégias cruciais.

Ao considerar as condições edafoclimáticas do semiárido brasileiro, visto que essa região sofre os impactos diretos das mudanças climáticas, o cultivo da palma forrageira emerge como uma alternativa de extrema importância para a região. Isso se deve, sobretudo, ao seu notável potencial na alimentação animal, exercendo impacto direto no desenvolvimento econômico de pequenas e médias propriedades (Galindo et al., 2005). Além disso, a adoção de práticas agrícolas,

como irrigação, consórcio e cobertura morta, representa uma forma de convivência com as adversidades climáticas (Souza et al., 2021).

4.4 Reúso de água na irrigação

O uso não racional e a inadequada gestão da água causam o esgotamento de muitas fontes, colocando a saúde e a economia das comunidades em risco (Barros et al., 2012). Motivado pela problemática da escassez hídrica, o reúso de água surge como uma alternativa considerada viável, sendo considerado uma importante prática na gestão dos recursos hídricos (Carvalho et al., 2015; Oliveira et al., 2021). Segundo Brancalione (2021), os principais benefícios ambientais do reúso de água são: redução da descarga de esgoto nos corpos hídricos, preservação dos recursos subterrâneos, minimização da poluição hídrica nos mananciais, maior estímulo ao uso racional de águas de boa qualidade. Estes aspectos favorecem o uso sustentável dos recursos hídricos.

Conforme Lima et al. (2005), na região semiárida do Brasil, o reúso pode ser uma fonte alternativa de água, carbono orgânico e nutrientes, com possibilidades de assegurar e incrementar a produção agrícola, principalmente de forrageiras (Pacheco et al., 2017; Carvalho et al., 2020; Carvalho et al., 2021) durante os períodos de seca prolongada, em especial para a agricultura familiar, contribuindo assim para a fixação do homem no campo. Para tanto, é essencial um constante monitoramento do solo devido ao uso de resíduos, para assim evitar contaminação do sistema solo-água-planta.

4.4.1. Reúso de água na agricultura: definições e aspectos legais

No Brasil não existe uma legislação específica que estabeleça restrições ao uso de água residuária na irrigação, todavia, existem algumas recomendações que embasam um esboço de utilização desses efluentes de forma segura, como a Resolução CONAMA N.º 357, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Além deste, algumas leis, normas e resoluções foram criadas com o intuito de regulamentar a questão da água, de uma maneira mais ampla. Segundo Fink e Santos (2002), o Código Florestal foi modificado em 1989 para dar uma proteção mais abrangente aos cursos e corpos de água, com o intuito de preservar a vegetação das propriedades rurais e urbanas e conseqüentemente, perenizar suas águas. Já em 2012, houve uma atualização do documento onde se estabeleceu diretrizes para a recuperação de áreas degradadas, incentivando práticas sustentáveis.

Com o intuito de complementar o arcabouço legal existente, foram sancionadas a Lei n.º 9.433, de 08 de janeiro de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e estabeleceu o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e a Lei n.º 9.984, de 17 de julho de 2000, que criou a Agência Nacional de Águas (ANA), entidade federal responsável pela implementação da política e coordenação do Sistema. Com isso, houve alguns avanços relacionados à temática do reúso de água.

O enquadramento das águas em classes é outro instrumento utilizado pela Política de Recursos Hídricos, e está intimamente relacionado ao reúso, conforme a lei n.º 9.433, de 8 de janeiro de 1997, considerando inicialmente que o reúso é o

reaproveitamento de águas já utilizadas e qualquer utilização que não seja primária se constitui em prática reúso, as classes inferiores de águas podem ser chamadas de águas para reúso, e se as águas comportam classes definidas segundo os usos preponderantes, leva-se em consideração o tipo de reúso para estabelecer classes. Portanto, a classificação das águas teria os seguintes objetivos no contexto do reúso. I — Assegurar às águas qualidade compatível com os usos mais exigentes a que forem destinadas; II — Determinar a possibilidade de usos menos exigentes por meio de reúso; III — Diminuir os custos de combate à poluição das águas, mediante ações preventivas permanentes, inclusive por meio do reúso.

Segundo a resolução CONAMA nº20/86, o reúso das águas é necessariamente reúso indireto, uma vez que, quando reutilizadas, pressupõe-se sua captação em cursos e corpos d'água de domínio público, e a referida Resolução somente classifica recursos hídricos de domínio público. Ao classificar as águas, a Resolução CONAMA n.º 20/86 já indica e define os usos preponderantes, definindo, conseqüentemente, o reúso indireto.

Quanto a resolução n.º 54, de 28 de novembro de 2005, do Conselho Nacional dos Recursos Hídricos (CNRH), esta estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, apresentando as definições relacionadas ao reúso, suas modalidades, as atribuições dos comitês de bacias hidrográficas e as informações pertinentes relacionadas ao reúso que devem ser repassadas para fins de cadastro.

Outro projeto importantíssimo dentro dessa temática é o Projeto Reúso, integrante do INTERÁGUAS (2018), que visa à elaboração de uma proposta de plano de ações para instituir uma política de reúso de efluente sanitário tratado no

Brasil. O Estudo foi dividido em seis produtos: produto I — Plano de Trabalho Ajustado (RP00); produto II — Relatórios de Experiências com Reúso (RP01A); produto III — Relatório de Critérios de Qualidade (RP01B); produto IV — Relatório de Potencialidades de Reúso (RP01C); produto V — Relatório de Modelos de Financiamento (RP02A); produto VI — Relatório de Plano de Ações/Política de Reúso (RF).

Internacionalmente, alguns países têm alcançado progressos significativos relacionados à regulamentação acerca do reúso para fins agrícolas, como Israel, Estados Unidos e outros países (Rodrigues, 2005). Em Israel, por exemplo, a Lei da Água foi formulada em 1959. Nos EUA, a United States Environmental Protection Agency (USEPA) publicou em 2004, diretrizes para nível de tratamento e critérios de qualidade de água para vários tipos de reúso (USEPA, 2004). A Organização Mundial pela Saúde (OMS) também publicou diretrizes para nível de tratamento e critérios de qualidade de água para vários tipos de reúso (WHO, 2006).

4.4.2. Forrageiras irrigadas com água residuária

Os recursos hídricos são essenciais e indispensáveis à vida, além disso, são importantíssimos para os sistemas: ambiental, social e econômico (Souza et al., 2014). Em consequência da escassez deste recurso em algumas regiões do país, os efluentes tratados representam uma fonte alternativa de água e nutrientes disponíveis para irrigação durante os períodos de estiagem ou até mesmo para as regiões que sofre com a baixa disponibilidade hídrica (Barbosa, 2014).

A prática de reutilizar águas para a irrigação de culturas ainda é recente no Brasil, todavia, diversos estudos têm sido realizados com o intuito de avaliar o desempenho de diversas culturas cultiváveis irrigadas com água residuária tratada e com isso, tem se observados os inúmeros benefícios da prática (Gomes et al., 2015; Manso et al., 2016; Gonçalves et al., 2017; Elamin et al., 2020; Carvalho et al., 2021)

Um ponto que deve ser avaliado cuidadosamente é a da cultura que será irrigada com as águas residuárias, pois estas devem não só apresentar características produtivas favoráveis, como também, recomenda-se que as plantas forrageiras selecionadas para estes fins devem ser perenes, com alta capacidade de extração de nutrientes, produção de matéria seca, cortes frequentes e sucessivos ao longo da maior parte do ano, que cubram bem o solo e sejam palatáveis aos animais. Além disto, precisam adaptar-se às condições de clima e solo locais, baixa suscetibilidade a pragas e doenças e tolerância à salinidade e toxicidade a íons específicos (Erthal et al., 2010). Considerando todos esses pontos, a palma forrageira e o sorgo têm demonstrado excelente potencial, segundo Carvalho et al. (2020) a produção do sorgo tem se destacado na região semiárida, e esse destaque está associado as características da cultura como sua adaptabilidade às condições climáticas e sua moderada tolerância a escassez hídrica e salinidade, possibilitando seu cultivo com água residuária.

4.5 Uso da cobertura morta em cultivos irrigados

Em termos conceituais, o solo agrícola é a terminologia utilizada para referir-se a um determinado solo que está apto para o desenvolvimento de atividades agrícolas, sendo um recurso natural multivalente e restrito, sendo resultado da

interação de diversos fatores como o material de origem, tipo de relevo e condições climáticas (Moreira et al., 2013; Lepsch, 2016). Por ser um recurso limitado, algumas ações devem ser adotadas a fim de modificar positivamente os sistemas de cultivo, visando resultados como controle de erosão, melhoria nas características físico-químicas e microbiológicas do solo para melhorar o seu potencial produtivo.

A opção por manejos menos intensivos e a adoção de práticas como rotação de cultura, cultivo mínimo, plantio direto e aplicação de cobertura morta, constituem práticas que contribuem para o acúmulo de carbono orgânico no solo e são alternativas eficazes para minimizar a compactação dos solos agrícolas (Domit et al., 2014). A aplicação de cobertura morta, por sua vez, é uma prática agrícola que proporciona uma série de benefícios para o solo e por consequência para o desenvolvimento das culturas cultiváveis, pois, regula a temperatura, melhora as taxas de infiltração e o aporte de carbono orgânico do solo e quando associado ao reúso hidroagrícola, potencializa a capacidade produtiva de regiões que sofrem com a escassez hídrica (Montenegro et al., 2013; Carvalho et al., 2020).

Dentre os materiais utilizados para essa finalidade, destaca-se a palhada deixada pelas culturas anteriores e o pó de coco, por serem de fácil aquisição e, em muitas regiões, serem abundantes. De acordo com Santos et al. (2019), a composição química, bem como a estrutura celular das fibras vegetais, possuem alta complexidade. A fibra de coco, destaca-se nesse cenário, ao ser um material que possui uma textura variável e está intimamente relacionada ao equilíbrio que existe entre o conteúdo de ar e de água, sendo, portanto, uma ótima alternativa em

cultivos agrícolas, além de favorecer a formação de raízes devido a suas características físico-químicas (Castoldi et al., 2014).

Dentro dessa temática, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas na região semiárida (Santana et al., 2015; Carvalho et al., 2020; Santos et al., 2020; Carvalho et al., 2021), muitas delas voltadas para a produção de forragem, o que é considerado bastante positivo sendo considerada uma excelente alternativa de convivência com a seca, viabilizando a produção agrícola e pecuária na região, pois a introdução de cobertura morta sobre o solo desempenha grande importância na agricultura irrigada, pois o material sob o solo altera a relação solo-água reduzindo a taxa de evapotranspiração das culturas, principalmente nos estádios onde a parte aérea das plantas não recobrem totalmente o solo, refletindo na redução da frequência de irrigação e conseqüentemente nos custos de operação do sistema (Locatelli et al., 2014).

No aspecto hidroagrícola, a utilização de cobertura morta nos cultivos contribui com a melhoria da retenção de água no solo, redução do impacto da chuva, dos processos erosivos e limitando a proliferação de plantas invasoras, além minimizar as taxas de evaporação de água presente no solo e conseqüentemente sua salinização (Wang et al., 2023, Yadav et al., 2023).

4.6 Fortalecimento da caprinovinocultura através da produção de forragem com água residuária no Semiárido

Na região semiárida, uma das atividades econômicas mais importantes é a criação de pequenos ruminantes. Cerca de 93% da atividade econômica na região é relacionada à criação de caprinos e 53% à criação de ovinos. No entanto,

inúmeras pesquisas mostram que em decorrência das problemáticas enfrentadas na região, como solos rasos e com baixa fertilidade, escassez hídrica, irregularidade das chuvas o suprimento alimentar dos animais é comprometido (Araújo Filho e Silva, 2000, Anuário da Pecuária Brasileira, 2005, Fonseca et al., 2019).

Melo e Voltolini (2019) ressaltam a necessidade de se cultivar pastagens a fim de garantir ao rebanho todo o aporte alimentar necessário e dentre as culturas forrageiras não convencionais, algumas plantas se destacam por sua adaptabilidade às condições do semiárido, como a palma forrageira, a mandioca, a maniçoba, o sorgo e a cana-de-açúcar (Cândido et al., 2009; Cândido et al., 2013; Carvalho et al., 2017).

A introdução da irrigação em áreas cultivadas com forragens não convencionais tem sido impulsionada nos últimos anos, ganhando cada vez mais visibilidade no cenário agrícola do semiárido brasileiro (Santos et al., 2017; Santos et al., 2020; Fonseca et al., 2021). Nesse contexto, o reúso hidroagrícola tem sido um dos protagonistas, considerando a grande necessidade hídrica exigida para fins de irrigação. Desse modo, o reúso planejado da água surge como uma alternativa sustentável no suprimento da quantidade de água demandada pelas culturas cultivadas, essencialmente em regiões que sofrem com a escassez (Moura et al., 2020).

4.7 Modelagem como ferramenta de gestão do solo e dos recursos hídricos

Segundo a Organização Mundial de Saúde (2020), aproximadamente dois bilhões de pessoas necessitam de acesso à água com qualidade adequada. No

Brasil este número é de aproximadamente 35 milhões de pessoas, o que é extremamente contraditório, considerando que o país detém 15% da água doce do mundo (Ribeiro et al., 2019), portanto, considerando a essencialidade da água a manutenção da vida e sua alta variabilidade espaço-temporal, faz-se cada vez mais necessário metodologias específicas para subsidiar as políticas de gestão.

Muitos modelos aplicados à modelagem hidrológica têm sido desenvolvidos ao longo dos anos, sendo estes capazes de representar processos do ciclo hidrológico mediante equações matemáticas (Pontes et al., 2015; Rodrigues et al., 2018). Todavia, muitos desses modelos exigem uma abundância de informação, limitando a sua aplicação, principalmente quando se trata da escassez de informações relacionadas aos recursos hídricos do país (Machado, 2017). Assim, o avanço na compreensão conceitual de todo o arcabouço matemático dos processos envolvendo o transporte da água e de solutos resultou em uma grande variedade de modelos analíticos e numéricos capazes de prever tais comportamentos. Dentro dessa perspectiva, os modelos baseados na Equação de Richards e na Equação de Convecção-Dispersão para o fluxo saturado e não saturado da água no solo e para o transporte de solutos, respectivamente, têm recebido larga aceitação (Simunek et al., 2009).

O solo é compreendido, do ponto de vista hidrológico, como um reservatório dinâmico, e a capacidade de água que pode ser armazenada é dependente de vários fatores, e de maneira geral, o balanço de água no solo é calculado considerando-se todas as entradas e as saídas do sistema. O monitoramento da dinâmica da sua umidade é de extrema importância para o planejamento agrícola. Tal balanço depende de processos climatológicos e hidrológicos nas mais diversas

escalas espaciais e temporais, subsidiando estudos hidroagrícolas de infiltração, irrigação, drenagem e para utilização na modelagem hidrológica e sedimentológica (Almeida e Serra, 2017).

O modelo Hydrus 1D vem sendo bastante utilizado em pesquisas da dinâmica da água e de solutos (Pinho et al., 2014, Shelia et al., 2018; Tonkul et al., 2019) em diferentes tipos solo, muitos deles desenvolvidos em perfis de solo, ressaltando a importância de aplicar o modelo a condições mais práticas, como desenvolvido por Kanzari et al. (2018) que investigaram o comportamento da umidade e o risco de salinização em região semiárida da Tunísia utilizando o modelo Hydrus-1D, e por Silva et al. (2015), que utilizaram o mesmo modelo para estudar a dinâmica da umidade em solos sob diferentes condições de cobertura no Semiárido pernambucano, é importante mencionar que estudos da dinâmica da umidade na região semiárida do Brasil ainda são escassos, e esse cenário precisa ser urgentemente modificado, visto que o monitoramento por meio da modelagem espaço-temporal, principalmente em áreas irrigadas com água residuária, serviria como subsidio para ações de manejo e conservação do solo e da água, como desenvolvido por Andrade et al. (2018).

Aires et al. (2022) avaliando a dinâmica da umidade e o estresse hídrico do solo, simulados pelo modelo Hydrus-1D, em cultivo de sorgo forrageiro irrigado, na presença e ausência da cobertura morta, verificaram que o modelo simulou adequadamente a dinâmica de umidade do solo, principalmente durante o período chuvoso e fornecendo o estresse hídrico ao longo do cultivo, representando uma importante ferramenta para monitoramento de cultivos irrigados.

Referências bibliográficas

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16783. Uso de fontes alternativas de água não potável em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 25p

Abusuwar, A.O. Effect Of Fermented Manures On Intercropped Sudan Grass (Sorghum Sudanese L.) And Clitoria (Clitoria Ternate) Grown In An Arid Saline Environment. The Journal Of Animal & Plant Sciences, V. 29, N. 1, P. 269-277, 2019.

Aires, G. C.; Montenegro, A. A. A.; Carvalho, A. A.; Monteiro, A. L. N.; Almeida, G. C. Umidade Do Solo E Estresse Hídrico Simulado Com Hydrus-1d Em Área Com Sorgo Forrageiro Irrigado. Agrometeoros, Passo Fundo, V.30, E026992, 2022. Doi: [Http://Dx.Doi.Org/10.31062/Agrom.V30.E026992](http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v30.e026992)

Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. Crop Evapotranspiration: Guidelines For Computing Crop Water Requirements. (Fao. Irrigation And Drainage Paper, 56). Roma: Fao, 300p. 1998.

Almeida, L.; Serra, J. C. V. Modelos Hidrológicos, Tipos E Aplicações Mais Utilizadas. Rev. Fae, Curitiba, V. 20, N. 1, P. 129 - 137, Jan./Jun. 2017

Alves, E. Da S., Lima, D. F., Barreto, J. A. S., Dos Santos, D. P., Dos Santos, M. A. L. Determinação Do Coeficiente De Cultivo Para A Cultura Do Rabanete Através De Lisimetria De Drenagem. Irriga, V. 22, N.1, P.194-203, 2017. Doi: [10.15809/Irriga.2017v22n1p194-203](https://doi.org/10.15809/irriga.2017v22n1p194-203).

Alves, F. A. L.; Andrade, A. P.; Bruno, R. L. A.; Santos, D. C.; Magalhães, A. L. R.; Silva, D. S. Chemical And Nutritional Variability Of Cactus Pear Cladodes, Genera Opuntia And Nopalea. American Journal Of Food Technology, V. 12, N. 1, P. 25-34, 2017.

Alves, O. F.; Elias, S.; Leite, M. L. D.M. V.; Azevedo, J. M.; De Souza Silva, J. P. S.; Nascimento, G. F.; Simplício, J. B. Características Agronômicas De Cultivares De Sorgo Em Sistema De Plantio Direto No Semiárido De Pernambuco. Revista Ciência Agrícola, 14, 29-36. 2016. Doi: [10.28998/Rca.V14i1.2318](https://doi.org/10.28998/Rca.V14i1.2318)

A., Atanasov., Radko, Mihaylov., Svilen, Hristov, Stoyanov., Desislava, Mihaylova., Peter, Benov. (2022). Drone-Based Monitoring Of Sunflower Crops. Annual Journal Of Technical University Of Varna, 6(1):1-9. Doi: 10.29114/Ajtuv.Vol6.Iss1.258

Anuário Da Pecuária Brasileira. São Paulo: Fnp Consultoria E Comércio, 2005.

Arennhardt, E. G. Et Al. A Sudangrass Cultivar With High Biomass And Grain Yields. Crop Breeding And Applied Biotechnonology, V. 16, P. 158-162, 2016.

Barbosa, M. S.; Santos, M. E. P.; Medeiros, Y. D. P. Viabilidade Do Reúso De Água Como Elemento Mitigador Dos Efeitos Da Seca No Semiárido Da Bahia. Revista Ambiente & Sociedade. São Paulo – Sp, V.17, N°2, P.17– 32, 2014.

Barros, K. K.; Nascimento, C. W. A.; Florencio, L. Nematode Suppression And Growth Stimulation In Corn Plants (Zea Mays L.) Irrigated With Domestic Effluent. Water Science And Technology. V. 66, P. 681-688, 2012. <https://doi.org/10.2166/Wst.2012.230>

Barrs, H. D.; Weatherley, P. E. A Re-Examination Of The Relative Turgidity Technique For Estimating Water Deficits In Leaves. Australian Journal Of Biological Sciences 15:413–428. 1962. <https://doi.org/10.1071/Bi9620413>

Brançalione, L. A Economia Circular Na Produção De Água De Reuso Para Fins Agrícolas. Epitaya E-Books, 1(11), 24-42. 2021. <https://doi.org/10.47879/Ed.Ep.2021366p24>

Cambardella, C. A.; Moorman, T. B.; Novak, J. M.; Parkin, T. B.; Karlen, D. L.; Turco, R. F.; Konopka, A. E. Field-Scale Variability Of Soil Properties In Central Iowa Soils. Soil Science Society Of America Journal, V.58, P.1501-1511, 1994. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>

Cândido, M.J.D.; Gomes, G.M.F.; Lopes, M.N. Cultivo De Palma Forrageira Para Mitigar A Escassez De Forragem Em Regiões Semiáridas. Informe Rural Etene. V.7, P.3, P.1- 7, 2013.

Carvalho G.G.P., Rebouças R.A., Campos F.S., Santos E.M., Araújo G.G.L., Gois G.C., Oliveira J.S., Oliveira R.L., Rufino L.M.A.; Azevedo J.A.G. Intake, Digestibility,

Performance, And Feeding Behavior Of Lambs Fed Diets Containing Silages Of Different Tropical Forage Species. *Animal Feed Science And Technology* 228, 140-8, 2017.

Carvalho, A. A.; Medeiros, V. W. C.; Glauco Estácio Gonçalves, G. G. Aplicação De Sensores De Baixo Custo Na Estimativa Da Evapotranspiração Potencial. *Journal Of Environmental Analysis And Progress*. V.6 N.2, 2021. <https://doi.org/10.24221/Jeap.6.2.2021.2843.119-127>

Carvalho, A. A.; Montenegro, A. A. A.; Tabosa, J. N.; Almeida, T. A.; 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.5, P.140–150, 2020 <https://doi.org/10.24221/Jeap.5.2.2020.2841.140-150>

Carvalho, R. T. L. Alimentos E Alimentação De Caprino-Ovinocultura No Brasil. *Revista Ciência Rural*, V.36, N.5, P.87-94, 2017

Carvalho, Ailton Alves De ; Montenegro, Abelardo A. De A. ; De Lima, João L. M. P. ; Silva, Thieres George Freire Da ; Pedrosa, Elvira Maria Regis ; Almeida, Thayná Alice Brito . Coupling Water Resources And Agricultural Practices For Sorghum In A Semiarid Environment. *Water*, V. 13, P. 2288, 2021.

Castoldi, R.; Gomes, R.F.; Charlo, H.C.O.; Melo, D.M.; Braz, L.T. Performance Of Cucumber Hybrids Cultivated In Coconut Fiber And Soil. *Horticultura Brasileira*, V.32, N. 1, P. 86-90, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362014000100014>

Chanakya, H. N. Khuntia, H. K. Treatment Of Gray Water Using Anaerobic Biofilms Created On Synthetic And Natural Fibers. *Process Safety And Environmental Protection*, Oxford, V 92, N. 2, P. 186-192, 2014. <https://doi.org/10.1016/J.Psep.2012.12.004>

Chen, W.; Lu, S.; Jiao, W.; Wang, M.; Chang, A.C. Reclaimed Water: A Safe Irrigation Water Source. *Environmental Development*, V.8, P.74-83, 2013. <https://doi.org/10.1016/J.Envdev.2013.04.003>

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.

Costa, J. P. N.; Medeiros, J. F.; Nunes, R. M. A.; Cavalcante Junior, E. G.; Lira, J. F. B. Crescimento E Produção Da Primeira Rebrota De Cultivares De Sorgo Sob Diferentes Lâminas De Irrigação. Revista Brasileira De Milho E Sorgo, V.16, N.3, P.449–459, Dez. 2017. <https://doi.org/10.18512/1980-6477/Rbms.V16n3p449-459>

Dal Bosco, T. C.; Gonçalves, F.; Andrade, F.C.; Taiatele Junior, I.; Silva, J. S.; Sbizzaro, M. Contextualização Teórica: Compostagem E Vermicompostagem. In: Dal Bosco, T. C. Compostagem E Vermicompostagem De Resíduos Sólidos: Resultados De Pesquisas Acadêmicas. São Paulo: Blucher, 2017. P.19-43. Doi: 10.5151/9788580392371-01

Deepika, Yadav., Ramana, Rao, Kv., Ayushi, Trivedi, Ayu., Yogesh, Rajwade., Neelendra, Verma. (2023). Reflective Mulch Films A Boon For Enhancing Crop Production: A Review. Environment Conservation Journal, 24(1):281-287. Doi: 10.36953/Ecj.12962367

Domit, L. A.; Okumura, R. S.; Barbosa, G. M. C.; Higashibara, L R.; Dalbosco, M.; Mariano, D. C.; Zorzenoni, T. O.; Guimarães, M. F. Tempo De Adoção Do Sistema Plantio Direto E A Relação Com Atributos De Solo. Revista Agrarian, Dourados, V.7, N.26, P.560-569, 2014.

Elamin, A.W.M.; Saeed, A.B.; Rahma, A.E.; Eldaiam, A.M.A.; Mohamedai. Productivity Of Maize (Zea Mays) And Sorghum (Sorghum Bicolor L.) Using Treated Wastewater For Irrigation. Sudan Journal Of Desertification Research, V.11, N.1, P.58-70, 2019.

Elias, Silva, de, Medeiros., Renato, Ribeiro, de, Lima., Carlos, Antonio, Costa, dos, Santos. (2023). Spatiotemporal Kriging for Days without Rainfall in a Region of Northeastern Brazil. Climate, doi: 10.3390/cli11010021

Elamin, A.W.M.; Saeed, A.B.; Rahma, A.E.; Eldaiam, A.M.A.; Mohamedai. Productivity Of Maize (*Zea Mays*) And Sorghum (*Sorghum Bicolor L.*) Using Treated Wastewater For Irrigation. *Sudan Journal Of Desertification Research*, V.11, N.1, P.58-70, 2019.

Feitosa, A. P.; Lopes, H. S. S.; Batista, R. O.; Costa, M. S.; Moura, F. N. Avaliação Do Desempenho De Sistema Para Tratamento E Aproveitamento De Água Cinza Em Áreas Rurais Do Semiárido Brasileiro. *Engenharia Ambiental: Pesquisa E Tecnologia* > Vol. 8, Nº 3. 2011

Feitosa, E. O.; Lopes, F.B.; Andrade, E. M.; Magalhaes, A. C. M.; Freitas, C. A. S. Environmental Impact Of Different Agricultural Production Systems. *Revista Ciência Agronômica*, V.52, P. E20196914, 2021.

Ferraz, R. L. S. Et Al. *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. *Journal Of Experimental Agriculture International*, V. 18, N. 3, P. 1-11, 2017.

Fink, D. R.; Santos, H. F. 2002. A Legislação De Reúso Da Água. In: Reúso De Água: Capítulo 8. Eds. P. C. Sanches Mancuso E H. Felício Dos Santos. Universidade De São Paulo – Faculdade De Saúde Pública, Associação Brasileira De Engenharia Sanitária E Ambiental – Abes. São Paulo. 2002.

Fonseca, V. A.; Rodrigues, C. S.; Alvarenga, R. R.; Santos, D. B.; Bebe, F. V.; Pina, D. S. Yield Of Gigante Cactus Pear Cultivated Under Biofertilizer Doses And Application Intervals. Doi: 10.1590/1807-1929/Agriambi.V25n9p633-640, V.25, P.648, 2021.

Fonseca, V. A.; Santos, M. R.; Silva, J. A.; Donato, S. L. R.; Rodrigues, C. S.; Brito, C. F. B. . Morpho-Physiology, Yield, And Water-Use Efficiency Of *Opuntia Ficus-Indica* Irrigated With Saline Water. *Acta Scientiarum Agronomy*, V.41, P.42631, 2019. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.V41i1.42631>

Freitas, V. R.; Cordeiro, L. F. A.; Melo, D. C. P.; Aquino, R. R. B.; Sales, A. T. Análise Dos Ganhos Econômicos E Ambientais Da Automação Industrial Para

Eficiência Energética De Uma Caldeira De Lenha. Revista Ibero-Americana De Ciências Ambientais. V. 12 N. 4. 2021.

Furtado, D.A.; Baracuchy, J. G. V.; Francisco, P. R. M. Tecnologias Na Região Semiárida Brasileira. In: Tecnologias De Convivência Com Semiárido Brasileiro. Edufcg, 2017. 130p.

Garcia-Cuerva, L.; Berglund, E. Z.; Binder, A. R. Public Perceptions Of Water Shortages, Conservation Behaviors, And Support For Water Reuse In The U. S. Resources, Conservation And Recycling, V.113, P.106-111, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.06.006>

Ghunmi, L. A. Et Al. Grey Water Treatment Systems: A Review. Critical Reviews In Environmental Science And Technology, V.41, N.7, P.657–698, 2011. <https://doi.org/10.1080/10643380903048443>

Gomes, T. M.; Rossi, F.; Tommaso, G.; Ribeiro, R.; Macan, N. P. F.; Pereira, R. S. Treated Dairy Wastewater Effect On The Yield And Quality Of Drip Irrigated Table Beet. Applied Engineering In Agriculture, V. 31, P.255 – 260, 2015.

Gonçalves, I. Z.; Barbosa, E. A. A.; Santos, L. N. S.; Nazário, A. A.; Feitosa, D. R.; Tuta, N. F.; Matsura, E. E. Water Relations And Productivity Of Sugarcane Irrigated With Domestic Wastewater By Subsurface Drip. Agricultural Water Management Journal, V. 185, P. 105 – 115, 2017.

Guimarães, T. R. F. C. S.; Costa J. P. N.; Medeiros, J. F. Uso De Água De Esgoto Doméstico Tratado Na Produção De Sorgo Soca. Revista Water Resources And Irrigation Management, V.7, N.1, P.01–07, 2018.

Heltberg, R., Siegel, P. B., & Jorgensen, S. L. Addressing Human Vulnerability To Climate Change: Toward A ‘No-Regrets’ Approach. Global Environmental Change, 19, 89–99. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.11.003>

Janani, Prasad. (2022). Ai/ML Drone-Based Arecanut Monitoring System (Adams). Journal Of Student Research, Doi: 10.47611/jsrhs.V11i4.3578

Jackson, R.D.; Idso, S.B.; Reginato, R.J.; Pinter Jr.; P.J. Canopy Temperature As A Crop Water Stress Indicator. *Water Resour*, V. 17, N.1, P.1133-1138, 1981.

Journel, A. G. *Fundamentals Of Geostatistics In Five Lessons*. Washington: American Geophysical Union, 1989. 40 P.

Kanzari, S.; Nouna, B.B.; Mariem, S.B.; Rezig, M. Hydrus-1d Model Calibration And Validation In Various Field Conditions For Simulating Water Flow And Salts Transport In A Semi-Arid Region Of Tunisia. *Sustain. Environ. Res.* 2018, 28, 350–356. <https://doi.org/10.1016/J.Serj.2018.10.001>

Lepsch, I. F. *Formação E Conservação Dos Solos*. Oficina De Textos. 2º Edição
Isbn: 978-85-7975-008-3. 2016.

Li, Y.; Babcock Jr., R.W. Modeling Hydrologic Performance Of A Green Roof System With Hydrus-2d. *Journal Of Environmental Engineer*, V.141, N.11, 2014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000976](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000976)

Lima, C.A.; Montenegro, A.A.A.; Lima, J.L.P.M.; Almeida, T.A.B.; Santos, J.C.N. Uso De Coberturas Alternativas Do Solo Para O Controle Das Perdas De Solo Em Regiões Semiáridas. *Engenharia Sanitária E Ambiental*, V.25, N.3, P.531-542, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020193900>

Lima, M. C. G.; Sá, S. M. F.; Souza, W. M.; Santos, T. E. M. Impactos Gerados E A Gestão Da Bacia Do Rio Capibaribe-Pe. *Journal Of Environmental Analysis And Progress*, V.03, P.75-85, 2018. <https://doi.org/10.24221/Jeap.3.1.2018.1658.075-085>

Loomis, R. S. Crop Manipulations For Efficient Use Of Water: An Overview. In: Taylor, H. M.; Jordan, W. R.; Sinclair, T. R. *Limitations To Efficient Water Use In Crop Production*. (Ed). American Society Of Agronomy, Crop Society Of America, And Soil Science Society Of America, Madison Wi . P.345-374, 1983.

Lopes, I.; Montenegro, A. A. A.; 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.1-15, 2019.
<https://doi.org/10.3390/W11040792>

Lourenço, Valéria Ramos ; Montenegro, A. A. A. ; Carvalho, A. A. ; Sousa, Lizandra De Barros De ; Almeida, T. A. B. ; Almeida, T. F. S. ; Vilar, B. P. . Spatial Variability Of Biophysical Multispectral Indexes Under Heterogeneity And Anisotropy For Precision Monitoring. Revista Brasileira De Engenharia Agricola E Ambiental, V. 27, P. 848-857, 2023.

Machado, T.T.V.; Dias, J.T.; Silva, T.C. Evolução E Avaliação Das Políticas Públicas Para A Atenuação Dos Efeitos Da Seca No Semiárido Brasileiro. Gaia Scientia, João Pessoa, V. 11, N.2, P.84-103, Jul. 2017.
<https://doi.org/10.22478/Ufpb.1981-1268.2017v11n2.31831>

Manso, R. T.; Alves, D. K. M.; Soares, F. A. L.; Cunha, F. N.; Teixeira, M. B.; Morais, W. A. Produtividade De Tomateiros Irrigados Com Água Residuária De Suinocultura. Revista Brasileira De Agricultura Irrigada. Fortaleza – Ce, V. 10, Nº6, P. 1075 – 1085, 2016.

Marques, O. F. C.; Gomes, L. S. P.; Mourthé, M. H. F.; Braz, T. G. S.; Neto, O. S. P. Palma Forrageira: Cultivo E Utilização Na Alimentação De Bovinos. Caderno Ciências Agrárias, V. 9, N. 1, P. 75-93, 2017.

Marques, P. A. A.; José, J. V.; Rocha, H. S.; Fraga Júnior, E. F.; Soares, D. A.; Duarte, S. N. Consumo Hídrico Do Manjerição Por Meio De Lisímetro De Drenagem. Revista Irriga, Botucatu, V.20, N.4, P.745-761, 2015.

Martins, D; Gonçalves, C. G.; Junior, A. C. S. Coberturas Mortas De Inverno E Controle Químico Sobre Plantas Daninhas Na Cultura Do Milho. Revista Ciência Agronômica, V.47, N.4, P.649-657, 2016. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160078>

Mayer, M. C.; Medeiros, S. S., Batista, M.D.; Barbosa, R. A.; Lambais, G. R.; Santos, S. L.; Haandel, A. V. Tratamento De Esgoto Na Zona Rural Visando Ao Reúso Agrícola No Semiárido Brasileiro. Revista Dae | São Paulo | V.69, N.229 / Pp 104-114 | Ed. Esp. Mar. 2021. <https://doi.org/10.36659/Dae.2021.023>

Melo, R. F.; Voltolini, T. V. Agricultura Familiar Dependente De Chuva No Semiárido. Editores Técnicos Embrapa Brasília, Df 2019.

Montenegro. A.A.A.; Abrantes J.R.C.B.; Lima, J.L.M.P.; Singh, V.P.; Santos, T.E.M. Impact Of Mulching On Soil And Water Dynamics Under Intermittent Simulated Rainfall. Catena, V.109 P.139–149, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.03.018>

Morais, M. A. Et Al. Contaminação Microbiológica No Perfil Do Solo Por Águas Residuárias. Holos, V.3, P.76, 23 Jun. 2016. <https://doi.org/10.15628/holos.2016.2782>

Moreira, F. M. S., Cares, J. E., Zanetti, R., & Sturmer, S. O Ecossistema Solo: Componentes, Relações Ecológicas E Efeitos Na Produção Vegetal. Editora Ufla. 2013. 352p. Isbn: 978-85-8127-023-4

Moura , P. G.; Aranha, F. N.; Handam, N. B.; Martin, L. E.; Salles, M. J.; Carvajal, E.; Jardim, R.; Martins, A. S. Água De Reúso: Uma Alternativa Sustentável Para O Brasil. Eng. Sanit. Ambient. | V.25 N.6 | Nov/Dez 2020 | 791-808. <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020180201>

Nascimento, A.R.L. Et. Al. Manejo Da Adubação Nitrogenada Em Solo Alcalino Cultivado Com Sorgo Sudão. Revista Gema – Ciências Ambientais E Biotecnologia, V. 6, N. 2, P. 72-80, 2020.

Oliveira, M. C.; Campos, J. M. S.; Oliveira, A. S.; Ferreira, M. A.; Melo, A. A. S. Enchmarks For Milk Production Systems In The Pernambuco Agreste Region, Northeastern Brazil. Revista Caatinga, V.3, N.29, P.725-734, 2016.

Oudin, L.; Hervieu, F.; Michel, C.; Perrin, C.; Andréassian, V.; Anctil, F.; Loumagne, C. 2005. Which Potential Evapotranspiration Input For A Lumped Rainfall–Runoff Model?: Part 2-Towards A Simple And Efficient Potential Evapotranspiration Model For Rainfall-Runoff Modelling. Journal Of Hydrology, 303, 290-306. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.025

Pereira, M. L. T.; Soares, M. P. A., Silva, E. A.; Montenegro, A. A. A.; Souza, W. M. Variabilidade Climática No Agreste De Pernambuco E Os Desastres Decorrentes Dos Extremos Climáticos. *Journal Of Environmental Analysis And Progress*, V. 02, P. 394-402, 2017. <https://doi.org/10.24221/Jeap.2.4.2017.1452.394-402>

Pinho, R.E.C.; Miranda, J.H. Avaliação Do Modelo Hydrus-1d Na Simulação Do Transporte De Água E Potássio Em Colunas Preenchidas Com Solos Tropicais. *Revista De Engenharia Agrícola*, V.34, N.5, P.899-911, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162014000500009>

Pontes, P. R., Collischonn, W., Fan, F. M., Paiva, R. C., & Buarque, D. C. Modelagem Hidrológica E Hidráulica De Grande Escala Com Propagação Inercial De Vazões. *Revista Brasileira De Recursos Hídricos*, 20(4), 888-904. 2015. Doi: 10.21168 / Rbrh.V20n4.P888-904

Ribeiro, W.C., Santos, C.L.S., Silva, L.P.B. Conflito Pela Água, Entre A Escassez E A Abundância: Marcos Teóricos. *Ambientes: Revista De Geografia E Ecologia Política* 1(2), 11 - 37. 2019. <https://doi.org/10.48075/Amb.V1i2.23619>

Rocha, R. S.; T. V. Voltolini & C. A. T. Gava. Características Produtivas E Estruturais De Genótipos De Palma Forrageira Irrigada Em Diferentes Intervalos De Corte. *Archivos De Zootecnia*. 2017; 66(5): 363-371.

Rodrigues, R. S. S., Bittencourt, G. M., & Fernandes, L. L. Escoamento Superficial Em Uma Pequena Bacia Hidrográfica Rural Da Amazônia. *Revista Brasileira De Cartografia*, 70(2), 605-628. 2018. Doi: 10.14393 / Rbcv70n2-45400

S. Er-Raki, J. Ezzahar, O. Merlin D, A. Amazirh, B. Ait Hssaine, M.H. Kharrou, S. Khabba, A. Chehbouni. Performance Of The Hydrus-1d Model For Water Balance Components Assessment Of Irrigated Winter Wheat Under Different Water Managements In Semi-Arid Region Of Morocco. *Agricultural Water Management* 244, 2021. 106546. <https://doi.org/10.1016/J.Agwat.2020.106546>

Santana, M. G. S. Efeito Do Reuso De Efluente De Esgoto Sobre Os Parâmetros De Crescimento E Nutrição Do Sorgo. 2015. 62 F. Dissertação (Mestrado Em Solos). Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza.

Santiago, F. S.; Jalfim, F. T.; Dombroski, S. A. G.; Blackburn, R. M. Manual De Implantação E Manejo Do Sistema Bioágua Familiar: Reuso De Água Cinza Doméstica Para A Produção De Alimentos Na Agricultura Familiar Do Semiárido Brasileiro. 1. Ed. Caraúbas: Atos, 2015. 194 F.

Santiago, F. S.; Jalfim, F. T.; Dombroski, S. A. G.; Silva, N. C. G.; Blackburn, R. M. Silva, J. K. M.; Neto, L. M.; Valença, J. R. F.; Nanes, M. B.; Ribeiro, G. A. Bioágua Familiar: Reuso De Água Cinza Para Produção De Alimentos No Semiárido. Recife: Projeto Dom Helder Câmara, 2012.

Santos Filho, M. E. C. E M. T. L. Araujo., 2018. Aspecto Para Implantação De Sistemas De Reuso De Águas Cinzas Em Comunidades Rurais No Estado Do Ceará – Estudo De Caso: Projeto São José Iii. In: Vi Simpósio Em Economia Rural: Políticas Públicas E Geração De Renda No Nordeste Rural. Fortaleza.

Santos K.C., Magalhães A.L.R., Silva D.K.A., Araújo G.G.L., Fagundes G.M., Ybarra N.G.; Abdalla A.L. Nutritional Potential Of Forage Species Found In Brazilian Semiarid Region. *Livestock Science* 195, 118-24, 2017.

Santos, D. E., Martinez, F. C. C., & Juiz, P. J. L. (2019). A Fibra De Coco Como Matéria-Prima Para O Desenvolvimento De Produtos: Uma Prospecção Tecnológica Em Bancos De Patentes. *Cadernos De Prospecção*, 12(1), 153. <https://doi.org/10.9771/Cp.V12i1.27230>

Santos, M. R.; Donato, S. L. R.; Cotrim Junior, P. R. F. Irrigação Na Palma Forrageira. *Revista Agrotecnologia*, V.1, P.75-83, 2020.

Santos, M. R.; Silva, A. J. P.; Fonseca, V. A.; Campos, A. R. F.; Lisboa, M. A. Irrigação Na Palma Forrageira. *Informe Agropecuário (Belo Horizonte)*, V.38, P.76-89, 2017.

Shamabadi, N., Bakhtiari, H., Kochakian, N., & Farahani, M. The Investigation And Designing Of An Onsite Grey Water Treatment System At Hazrat-E-Masoumeh University, Qom, Iran. *Energy Procedia*, 74, P.1337-1346, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.780>

Shelia, V.; Šimunek, J.; Boote, K.; Hoogenboom, G. Coupling Dssat And Hydrus-1d For Simulations Of Soil Water Dynamics In The Soil-Plant-Atmosphere System. *J. Hydrol. Hydromech.* 2018, 66, 232–245. Doi: 10.1515 / Johh-2017-0055

Silva, C. H. S. T.; Nunes, B. R. P.; Silva, E. S.; Pires, J. F. B.; Almeida, S. N. R.; Morais, M. S. N.; Silva, V. M. A.; Freitas, C. S. Avaliação Comparativa De Agentes Coagulantes Químico E Natural No Tratamento Do Efluente Da Lavagem De Veículos No Município De Sumé-Pb. *Brazilian Journal Of Development*, V.6, N.1, P.1670-1687, 2020.

Silva Tgf, De Medeiros Rs, Arraes Fdd, Ramos Cmc, Araújo Júnior Gdn, Jardim Amdrf, Alves Cp, Campos Fs, Da Silva Mv, De Moraes Jef, De Souza Caa, Siqueira E Silva Sm, Dos Santos Dc, De Carvalho Aa, De Souza Lsb. Cactus-Sorghum Intercropping Combined With Management Interventions Of Planting Density, Row Orientation And Nitrogen Fertilisation Can Optimise Water Use In Dry Regions. *Sci Total Environ.* 2023 Jun 24;895:165102. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.165102.

Šimunek, J.; Sejna, M.; Saito, H.; Sakai, M.; Van Genuchten, M.T. The Hydrus-1d Software Package For Simulating The One-Dimensional Movement Of Water, Heat And Multiple Solutes In Variably-Saturated Media. Version 4.16. Hydrus Software Series 3. Riverside: Department Of Environmental Sciences, University Of California, 2013.

Šimunek, J.; Šejna, M.; Saito, M. H.; Sakai, M.; Van Genuchten, M. T. The Hydrus-1d Software Package For Simulating The One-Dimensional Movement Of Water, Heat, And Multiple Solutes In Variably-Saturated Media. Version 4.08. Riverside, Usa: University Of California, Department Of Environmental Sciences, 2009.

Souza, D. C. F. Et Al. Zoneamento Agroclimático Da Palma Forrageira (Opuntia Sp.) Para O Estado De Sergipe. Revista Brasileira De Agricultura Irrigada, 12: 2338-2347, 2018.

Souza, C.F.; Bastos, R.G.; Gomes, M.P.M.; Pulschen, A.A. Eficiência De Estação De Tratamento De Esgoto Doméstico Visando Reuso Agrícola. Ambiente & Água, V.10, N.3, P.587-597, 2015. <https://doi.org/10.4136/Ambi-Agua.1549>

Taiz, L.; Zeiger, E.; Moller, I. M.; Murphy, A. Fisiologia E Desenvolvimento Vegetal. 6. Ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.

Tonkul, S., Baba, A., Şimşek, C. Et Al. Estimativa De Recarga De Água Subterrânea Usando O Modelo Hydrus 1d Na Sub-Bacia De Alaşehir Da Bacia De Gediz Na Turquia. Environ Monit Assess 191, 610 (2019). <https://doi.org/10.1007/S10661-019-7792-6>

Trilles, S.; Torres-Sospedra, J.; Belmonte, Ó.; Zarazaga-Soria, F. J.; González-Pérez, A.; Huerta, J. Development Of An Open Sensorized Platform In A Smart Agriculture Context: A Vineyard Support System For Monitoring Mildew Disease. Sustainable Computing: Informatics And Systems. 2019. 30p. Doi: 10.1016/J.Suscom.2019.01.011

Van Genuchten, M. Th. 1980. A Closed-Form Equation For Predicting The Hydraulic Conductivity Of Unsaturated Soils. Soil Sci. Soc. Am. J.44: 892–898. <https://doi.org/10.2136/Sssaj1980.03615995004400050002x>

Vauclin, M.; Vieira, S. R.; Vachaud, G.; Nielsen, D. R. The Use Of Cokriging With Limited Field Soil Observations. Soil Science Society Of America Journal, Madison, V.47, N.1, P.175-184, 1983. <https://doi.org/10.2136/Sssaj1983.03615995004700020001x>

Vilela, M. S.; Cabral Filho, F. R.; Teixeira, M. B.; Amaral, A. M.; Vellame, L. M.; Soares, F. A. L. Acurácia De Um Mini-Lisímetro De Pesagem Eletrônica De Baixo Custo. Irriga, [S.L.], V.1, N.2, P.158–167, 2015. <https://doi.org/10.15809/Irriga.2015v1n2p158>



Von Pinho, R. G.; Fiorini, I. V. A.; Santos, A. O. Botânica In: Borém, A.; Pimentel, L. D.; Parrella, R. A. C. *Sorgo Do Plantio À Colheita*. Viçosa, Mg: Ed. Ufv, 275 P. 2014.

Wells, T.; Hancock, G. R.; Martinez, C.; Dever, C.; Kunkel, V.; Gibson, A. Differences In Soil Organic Carbon And Soil Erosion For Native Pasture And Minimum Till Agricultural Management Systems. *Science Of The Total Environment*, V.666, P.618–630, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.097>

Yeomans, J. O.; Bremner, 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.

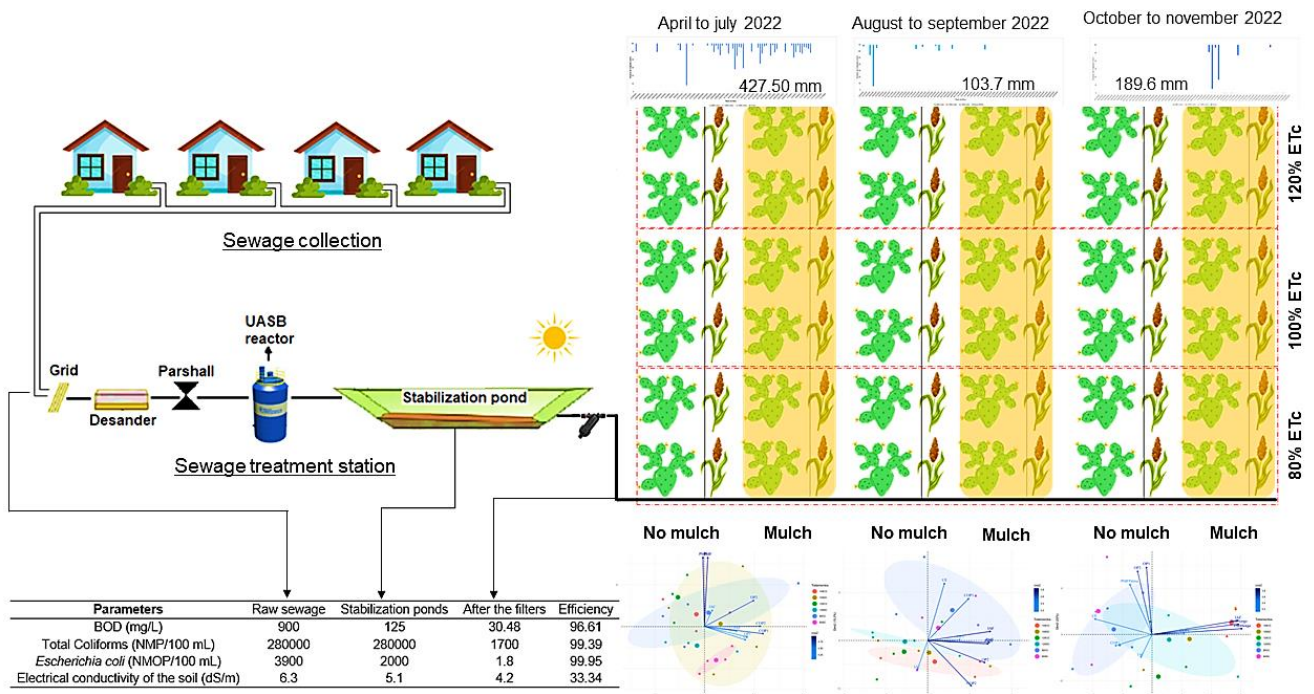


CAPÍTULO 2

Estratégias Sustentáveis para Produção Agrícola no Semiárido Brasileiro: Análise do Consórcio Sorgo-Palma sob Irrigação com Efluente Tratado e Cobertura Morta

CAPÍTULO 2 – Estratégias Sustentáveis para Produção Agrícola no Semiárido Brasileiro: Análise do Consórcio Sorgo-Palma sob Irrigação com Efluente Tratado e Cobertura Morta

GRAPHICAL ABSTRACT



Resumo

No cenário de mudanças climáticas, estratégias de produção agrícola na região do semiárido brasileiro são necessárias e urgentes. Dentro desse contexto, muitas abordagens já apresentam resultados bem estabelecidos, no entanto, a associação de algumas técnicas ainda não se apresentam completamente consolidadas, como o consórcio sorgo-palma com aplicação de cobertura morta, utilizando irrigação com efluente tratado. O objetivo desse trabalho foi analisar o desempenho produtivo do sorgo consorciado com a palma em região semiárida brasileira. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados (DBC), com quatro repetições e empregado o esquema de parcelas subdivididas (3 x 2 m), as parcelas sendo as três lâminas de irrigação (80, 100, 120% da ETc), e a cobertura morta (parcela com cobertura e parcela sem cobertura) sendo as subparcelas. As plantas de palma foram distribuídas a cada 0,2 m entre si e 1,0 m entre fileiras de plantio e as plantas de sorgo foram distribuídas entre as fileiras da palma, adotando-se um stand final de 12 plantas por metro linear. Verificou-se que, apesar da irrigação com efluente doméstico tratado ter elevado a salinidade do solo, a ocorrência de chuvas promoveu a diminuição da salinidade do solo devido à sua capacidade de lixiviação dos sais ao longo do perfil do solo. A análise de componentes principais permitiu observar que as variáveis LAI, FMY_Shorgum e DMY_Shorgum apresentaram alta correlação entre elas. Com isso, foram utilizadas duas metodologias para estimativa do índice de área foliar, onde foi verificado que ambos os modelos apresentaram excelentes resposta na estimativa. Outra constatação da PCA foi que as variáveis hidrológicas NRC e a TP são inversamente proporcionais a salinidade do solo, e que no corte 1 (período chuvoso), houve uma diminuição da EC do solo. Além disso, constatou-se que a lâmina recomendada para irrigação de sorgo consorciado com a palma forrageira em regiões semiáridas é a de 80% da ETc com utilização de cobertura morta, favorecendo o potencial produtivo em regiões com baixa disponibilidade hídrica.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, consórcio, cobertura morta, reúso, manejo de irrigação

1. Introdução

A produção agrícola em regiões semiáridas e áridas é uma atividade desafiadora (Muralikrishnan et al., 2022), pois são regiões caracterizadas pela irregularidade e escassez de chuvas, elevadas temperaturas, altas taxas de evapotranspiração, enfrentando desafios em termos de produção agrícola e declínio dos recursos hídricos (Lemos et al., 2021; Lessa et al., 2023; Santacruz-De León et al., 2022), principalmente sob efeitos das mudanças climáticas (Chadalavada et al., 2021; Dantas et al., 2023). O planejamento do cultivo tendo como base apenas os períodos chuvosos, pode acarretar prejuízos inestimáveis, pois, considerando as previsões futuras, existem perspectivas de diminuição da chuva, dos dias chuvosos e aumento da variabilidade espaço-temporal no Semiárido brasileiro (Carvalho et al., 2020).

O consórcio agrícola entre forragens vem recebendo crescente atenção nos últimos anos, conforme indicado por estudos anteriores (Alves et al., 2021; Chimonyo et al., 2018; Jardim et al., 2020, 2021; Lima et al., 2018). No contexto específico do consórcio sorgo-palma, destacam-se benefícios complementares entre essas duas culturas. A palma forrageira se destaca por sua riqueza em água e carboidratos, enquanto apresenta baixos teores de fibras e proteínas (Queiroz et al., 2020; Montenegro et al., 2020), dessa forma de têm se destacado como a cactácea mais plantada no mundo, apresentando excelentes respostas produtivas aplicando-se lâminas de irrigação em complementação a chuva (Lopes et al., 2019; Araújo Júnior et al., 2021; de Sá Souza et al., 2022; Jardim, et al., 2023). Por outro lado, o sorgo é caracterizado por seu alto teor de fibras e por exibir boa tolerância

a situações de déficit hídrico e estresse salino (Carvalho et al., 2020; Chaganti et al., 2021; Jardim, et al., 2023).

A irrigação de forragens com água residuária é uma prática viável e segura na produção agrícola, desde que tratada adequadamente, com monitoramento contínuo dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos a fim de garantir a qualidade da água (Carvalho et al., 2020; Mainardis et al., 2022). Neste contexto, estudos recentes têm demonstrado que, quando devidamente planejados, os esgotos possuem um notável potencial como fonte de recursos hídricos para a agricultura, proporcionando benefícios nas esferas social, econômica e ambiental (Nyagatare et al., 2021; Patil et al., 2022; Veettil et al., 2022).

Diante do atual cenário de mudanças climáticas, associado a utilização de efluentes residuais, a adoção de práticas sustentáveis, como aplicação de cobertura morta e o manejo da irrigação, com ênfase na economia de água, impacta diretamente na gestão sustentável dos recursos hídricos, potencializando a produtividade e promovendo resiliência agrícola (Akhtar et al., 2020; Zhang et al., 2020; Alves et al., 2022). No aspecto hidroagrícola, a utilização de cobertura morta nos cultivos contribui com a melhoria da retenção de água no solo, redução do impacto da chuva, dos processos erosivos e limitando a proliferação de plantas invasoras, além minimizar as taxas de evaporação de água presente no solo e consequentemente sua salinização (Montenegro et al., 2013; El-Mageed et al., 2018; Lopes et al., 2019; Mendonça et al., 2019; Montenegro et al., 2020; Sena et al., 2020).

Estudos explorando o consórcio sorgo-palma, que abordem a aplicação de diferentes lâminas de irrigação e que permitam averiguar o emprego do déficit hídrico controlado para melhor configuração de manejo, garantindo o uso eficiente

da água, sem afetar a resposta produtiva das culturas, reduzindo os custos de produção são necessários (Lima et al., 2018; Yang et al., 2019; Alves et al., 2021; Silva et al., 2023). Kothari et al. (2020) relatam que a irrigação com déficit de 20% é considerado ideal, visto que obteve maior eficiência no uso da água do que irrigando 100% da demanda hídrica do sorgo granífero.

No entanto, o manejo de irrigação deficitária, apesar de gerar uma economia de aproximadamente 12% de água, pode causar até 94% mais acúmulo de sal (Raeisi et al., 2019; Du et al., 2019; Yan et al., 2021).

Carvalho et al. (2021), ao testar diversas lâminas de irrigação com água residuária no cultivo de sorgo, observaram que a cultura foi capaz de superar os desafios e aumentar significativamente sua produção de massa seca, mesmo em condições de elevação da salinidade do solo, quando aplicada a cobertura morta. Nesse experimento, a chuva desempenhou um importante papel na redução da salinidade do solo. Estudos mostram que a chuva desempenha papel fundamental na lixiviação dos sais (Libutti et al., 2018; Yang et al., 2019; Carvalho et al., 2020). Todavia, além de estudar as estratégias de cultivo, é muito importante fazer uma investigação aprofundada do comportamento hidrológico da região, principalmente quando se faz uso de águas de menor qualidade, bem como de seus efeitos no solo, principalmente o efeito da salinização (Abd-Elwahed, 2018; Basile e Coppola, 2019).

Outro estudo relevante é o de Silva et al. (2023) que investigaram como diferentes espaçamentos e orientações de plantio, adubação nitrogenada e consórcios influenciam a dinâmica da água no solo, a partição da evapotranspiração e os indicadores de uso da água em plantações de palma e consórcio palma-sorgo. Todavia, os estudos supracitados ainda não estão

completamente consolidados, principalmente quando se trata da associação de mais de uma estratégia de produção, como o cultivo consorciado sorgo-palma atrelado a temas como reúso de efluentes, com aplicação diferentes lâminas de irrigação, e utilizando cobertura morta.

Neste estudo, foi abordado a temática da irrigação com efluente doméstico tratado, associado a cobertura morta em cultivos de forrageiras consorciadas. A hipótese fundamental desse estudo, é que a irrigação deficitária associada a cobertura morta ampliaria o desempenho produtivo das culturas sem afetar o sistema planta-solo, aumentando assim a eficiência do uso da água e prevenindo a salinização do solo. Dessa forma, a presente pesquisa possui como objetivo analisar o desempenho produtivo do sorgo consorciado com a palma em região semiárido do território brasileiro. Como objetivos específicos têm-se: (1) respostas das culturas as diferentes lâminas de irrigação; (2) o uso de cobertura morta associadas ao reúso de esgoto tratado; (3) e os efeitos nos níveis de salinidade e concentração de carbono orgânico do solo.

2. Material e Métodos

2.1 Caracterização da área de estudo

O experimento foi conduzido em uma unidade experimental localizada no Distrito de Mutuca, pertencente ao município de Pesqueira–PE, ($7^{\circ} 15' 18''$ S; $35^{\circ} 52' 40''$ W; 550 m). (Figura 1). A região é pertencente a Bacia do Ipojuca e possui o clima classificado como AW (Clima Tropical de Savana) e BSh (Clima Semiárido Quente) conforme a classificação de Köppen (Alvares et al., 2013), com

temperatura média de 27 °C, precipitação média anual de 670 mm e evapotranspiração média em torno de 1800 mm ano⁻¹.

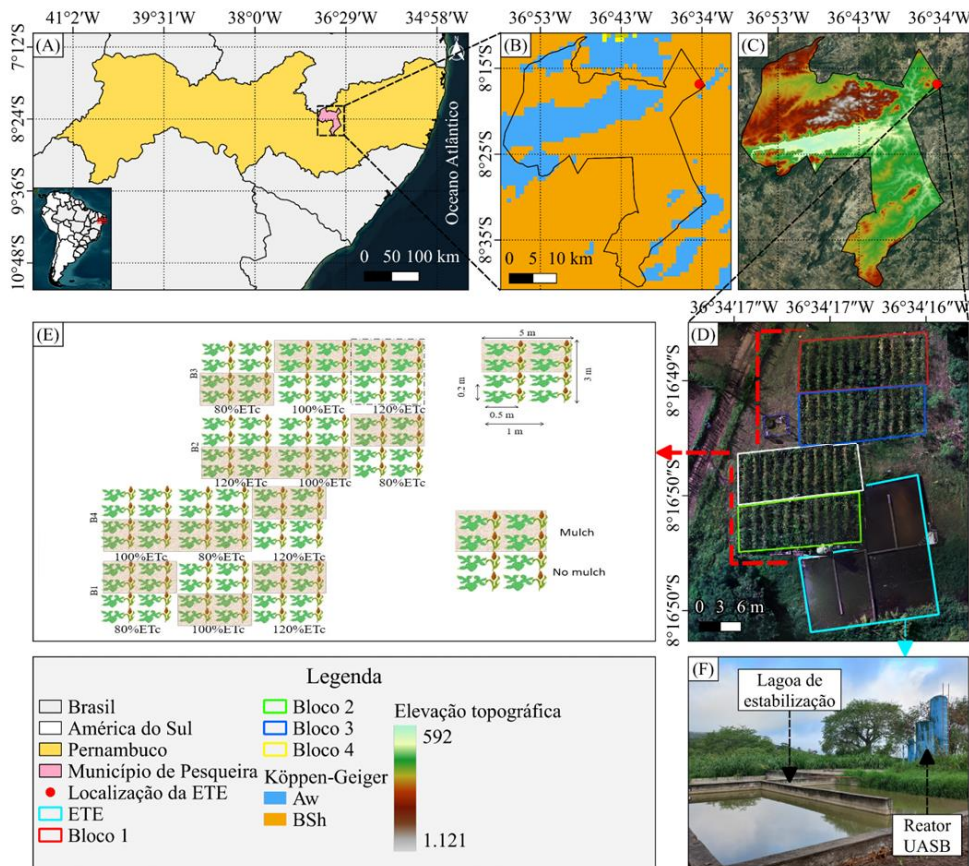


Figura 1. Mapa de localização da área experimental (a); localização do município de Pesqueira–PE (b), altimetria do município de Pesqueira (c), croqui do experimento (d), imagem da área com a subdivisão dos blocos (e) estação de tratamento de esgoto (f).

A presente região tem a predominância das seguintes classes de solos: Planossolos, Neossolo Regolítico, Argissolos Amarelo e Vermelho-Amarelo e Neossolo Líticos, além de significativas áreas de Afloramentos de Rocha (Santos

et al., 2012). Os resultados da análise química e textural do solo estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Análise química e textural de solo utilizado para cultivo de palma-sorgo.

Areia	Silte	Argila	pH	CES
%	%	%		dS m ⁻¹
72,09	11,46	16,45	7,81	1,64
N	P	K	Na	COT
g kg ⁻¹	mg dm ⁻³	cmol dm ⁻³	cmol dm ⁻³	g kg ⁻¹
3,34	87,83	1,42	1,93	11,16

O efluente utilizado na irrigação do experimento foi obtido da estação de tratamento de esgoto (ETE) (Figura 1a), que recebe águas residuárias de 150 residências, gerando uma vazão aproximada de 3000 L dia⁻¹. As águas residuais passam por um tratamento preliminar que ocorre em uma caixa com grade, a fim de separar os materiais grosseiros. Posteriormente, o efluente passa por uma caixa de areia e são conduzidos aos reatores UASB, tratados e encaminhados para lagoas de estabilização, de onde é bombeado efluente polido para irrigação. Foi realizado uma análise do efluente em três pontos de coleta: i – caixa de areia (esgoto bruto); ii – lagoa de polimento; iii – após o sistema de filtragem. Os parâmetros analisados foram: DBO, condutividade elétrica, pH, coliformes totais, *escherichia coli*. Os resultados da análise, estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros do efluente utilizado no cultivo.

Parâmetros	Esgoto bruto	Lagoa de estabilização	Após os filtros	Eficiência
DBO (mg/L)	900	125	30,48	96,61
Coliformes totais (NMP/100 mL)	280000	280000	1700	99,39
<i>Escherichia coli</i> (NMOP/100 mL)	3900	2000	1,8	99,95
Condutividade elétrica do solo (dS/m)	6,3	5,1	4,2	33,34

2.2 Características das cultivares utilizadas

Na área experimental foi cultivado o sorgo cv. IPA SUDAN 4202 (*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf) consorciado com a variedade de palma forrageira, Orelha de Elefante Mexicana (*Opuntia stricta* (Haw) Haw.). Os plantios do sorgo e da palma foram realizados nos dias 12 de abril de 2022, e 12 de maio de 2021, respectivamente.

O sorgo cv. IPA SUDAN 4202 é também conhecido como sorgo Sudão, desenvolvido pelo Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) com apoio da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), possui origem africana e dentre suas principais características, destacam-se: sua alta eficiência no uso da água, com ótima adaptação às condições de estresse hídrico, boa tolerância a salinidade do solo, além de possuir expressivo potencial para produção de forragem e silagem e pastejo (IPA, 2007).

A palma forrageira orelha de elefante mexicana (*Opuntia stricta*), por sua vez, é uma planta suculenta da família das cactáceas. Nativa da região tropical e subtropical da América Central e do Sul, a palma forrageira orelha de elefante

mexicana possui características como: boa resistência à seca, tolerância à salinidade, alta produtividade e facilidade com relação a sua propagação (Alves et al., 2021; Araújo Júnior et al., 2021). Dessa forma, é uma cultura versátil que se apresenta como uma excelente alternativa de alimentação animal em ambientes que sofrem com escassez hídrica, como a região semiárida.

2.3 Delineamento experimental e tratamentos

Foi utilizado o delineamento experimental em blocos casualizados (DBC), com quatro repetições e empregado o esquema de parcelas subdivididas (3 x 2 m), as parcelas sendo as três lâminas de irrigação (80, 100, 120% da Evapotranspiração da cultura, ETc), e a cobertura morta (parcela com cobertura e parcela sem cobertura) sendo as subparcelas (Figura 1b). Foi utilizada uma parcela com dimensão de 15 m² (5 x 3 m) e a subparcela foi de 7,5 m² (2,5 x 3,0 m), com área útil de 3 m², onde foram consideradas as fileiras centrais. As plantas de palma foram distribuídas a cada 0,2 m entre si e 1,0 m entre fileiras de plantio e as plantas de sorgo foram distribuídas entre as fileiras da palma, adotando-se um stand final de 12 plantas por metro linear. O período de avaliação foi de 19 de abril de 2022 à 30 de novembro de 2022, considerando três cortes do sorgo, sendo: corte um de 19 de abril de 2022 a 31 de julho de 2022; corte dois de 01 de agosto de 2022 a 30 de setembro de 2022; e corte três de 01 de outubro de 2022 a 30 de novembro de 2022.

A cobertura morta utilizada era composta por material vegetal presente na área experimental, e foram identificadas as seguintes espécies: capim corrente (*Urochloa mosambicensis*), pé de galinha (*Eleusine indica*) capim carrapicho

(*Cenchrus echinatus*) e chichá (*Sterculia striata*). A densidade de cobertura morta adotada foi de 8 Mg ha⁻¹.

2.4 Sistema e manejo de irrigação adotados

O sistema de irrigação utilizado foi o gotejamento com orifícios de 1,6 mm, com espaçamento de 0,2 m e vazão de 2,1 m³ h⁻¹. Para garantir a eficiência do sistema, foi realizado o teste de eficiência da aplicação conforme Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) (Justi et al., 2010), onde se obteve uma uniformidade de 97%.

O manejo da irrigação foi realizado com base na evaporação diária do Tanque Classe A. Para se obter a evapotranspiração da cultura de interesse, que neste caso foi o sorgo, utilizou-se a equação 1.

$$ET_c = ET_o * K_c \quad (1)$$

em que,

ET_c – Evapotranspiração da cultura (mm dia⁻¹);

ET_o – Evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹);

K_c – Coeficiente de cultivo (Adimensional).

Foi considerado o coeficiente de cultivo (K_c) do sorgo, segundo as fases fenológicas da cultura, sendo estas, fase I (Semeadura e estabelecimento – 0,4); fase II (crescimento vegetativo – 1,1); fase III (floração e formação da produção – 1,0); e fase IV (maturação – 0,7) (Costa et al., 2017).

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi determinada a partir de medidas de evaporação do Tanque Classe “A” (EV) e por meio do coeficiente do tanque (K_p), conforme equação 2.

$$ET_o = K_p * EV \quad (2)$$

A quantidade de água a ser aplicada, com uma frequência de dois dias, levou em consideração a quantidade de água evaporada durante o período previsto entre duas irrigações, turno de rega de dois dias, conforme adotado por (Carvalho et al., 2020), além de considerar também as características específicas de cada tratamento (80, 100, 120% da Evapotranspiração da cultura, ET_c).

2.5 Avaliações relacionadas ao solo

As coletas de solo foram realizadas a cada dois meses e foram consideradas as seguintes variáveis: umidade do solo (SM), condutividade elétrica (EC) e estoque de carbono do solo (CS). As coletas foram realizadas em duas profundidades: camada 1 (0 – 0,10 m) e camada 2 (0,10 – 0,20 m). A umidade do solo foi determinada por gravimetria.

A condutividade elétrica do solo (EC), determinada conforme o método usual de saturação-extrato (EMBRAPA, 1999). A determinação do carbono orgânico total do solo, por sua vez, foi realizada de acordo com metodologia proposta por (Yeomans e Bremner, 1988), que se baseia na redução do dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) por compostos de carbono orgânico presente no solo e na subsequente

determinação do $K_2Cr_2O_7$ por titulação com sulfato ferroso amoniacal ($0,4 \text{ mol L}^{-1}$), conforme (Cantarella e Trivelin, 2011). Os valores de estoque de carbono foi obtido por meio do produto do carbono orgânico total, densidade do solo e a profundidade de interesse.

2.6 Avaliações relacionadas às plantas

As análises biométricas foram realizadas em intervalos bimensais para a palma e mensais para o sorgo e foram consideradas as seguintes variáveis: para a cultura da palma: altura da planta, largura da planta, número de cladódios, comprimento do cladódio, largura do cladódio, espessura do cladódio, área do cladódio, conforme Silva et al. (2015) e índice de área do cladódio, de acordo com metodologia proposta por Pinheiro et al. (2014).

E para o sorgo foram analisados: altura da planta, largura da planta, espessura do colmo, número de folhas vivas, número de folhas mortas, comprimento da panícula, largura da panícula, comprimento da folha +3, largura da folha +3, área foliar, conforme Shih et al. (1981) (Equação 3) e o índice de área foliar (Pinheiro et al., 2014) (Equação 4). As produtividades de massa seca e fresca do sorgo foram realizadas a cada final de ciclo, enquanto para a palma, só foi considerada ao final dos três ciclos.

$$AF = 0.741 * CF_{+3} * LF_{+3} \quad (3)$$

$$IAF = \frac{AF * NFV}{E_1 * E_2} \quad (4)$$

em que,

AF = área foliar (cm²);

CF₊₃ = comprimento da folha +3 (cm);

LF₊₃ = largura da folha +3 (cm);

IAF = índice de área foliar (cm² cm⁻²);

NFV = número de folhas vivas (unidades);

E₁ = espaçamento entre linhas (cm);

E₂ = espaçamento entre plantas (cm).

2.7 Análise dos dados

Os resultados obtidos da biometria das plantas e das relacionadas ao solo foram submetidos à análise de variância, pelo teste F ($p \leq 0,05$), para lâminas de irrigação e condição de cobertura morta no solo. Para identificar diferenças entre os tratamentos, as médias foram comparadas por meio do teste Tukey ($p \leq 0,05$).

Foi realizado também a análise multivariada de componentes principais (PCA) para identificar as variáveis mais relevantes e mais fortemente relacionadas às variáveis produtivas das culturas estudadas. O processamento das análises estatísticas foi feito com auxílio do software computacional “R” versão 4.2.1 (R Development Core Team, 2023).

Foram utilizados modelos de regressão linear múltipla (RLM), e o modelo de inteligência artificial Random Forest Regressor (RF) para modelagem do índice de área foliar com base no rendimento de massa seca e fresca do sorgo. Para a aplicação do Random Forest Regressor, o banco de dados foi dividido em 80% para

treinamento e 20% para teste. O desempenho dos modelos para estimação de novos dados foi feito usando as métricas de avaliação R^2 , RMSE e MAE.

Para o modelo de inteligência artificial, Random Forest Regressor (RF), os algoritmos foram programados na linguagem de programação Python 3.7 usando as bibliotecas de computação científica pandas, numpy, seaborn e matplotlib.pyplot para os algoritmos de regressão.

3. Resultados

3.1 Regime pluviométrico e manejo da irrigação

A Figura 2 apresenta o quantitativo de precipitação e irrigação aplicada correspondente a cada lâmina ao longo do período de avaliação. Nos três cortes do sorgo, os eventos de chuva e irrigação totalizaram 933,90 mm, sendo 427,50; 103,7 e 189,6 mm correspondentes à chuva total (PT) por ciclo, com precipitações máximas (PM) de 52, 55 e 82 mm e a irrigação total (IT) por ciclo foi de 33,06; 97,07 e 82,97 mm, respectivamente.

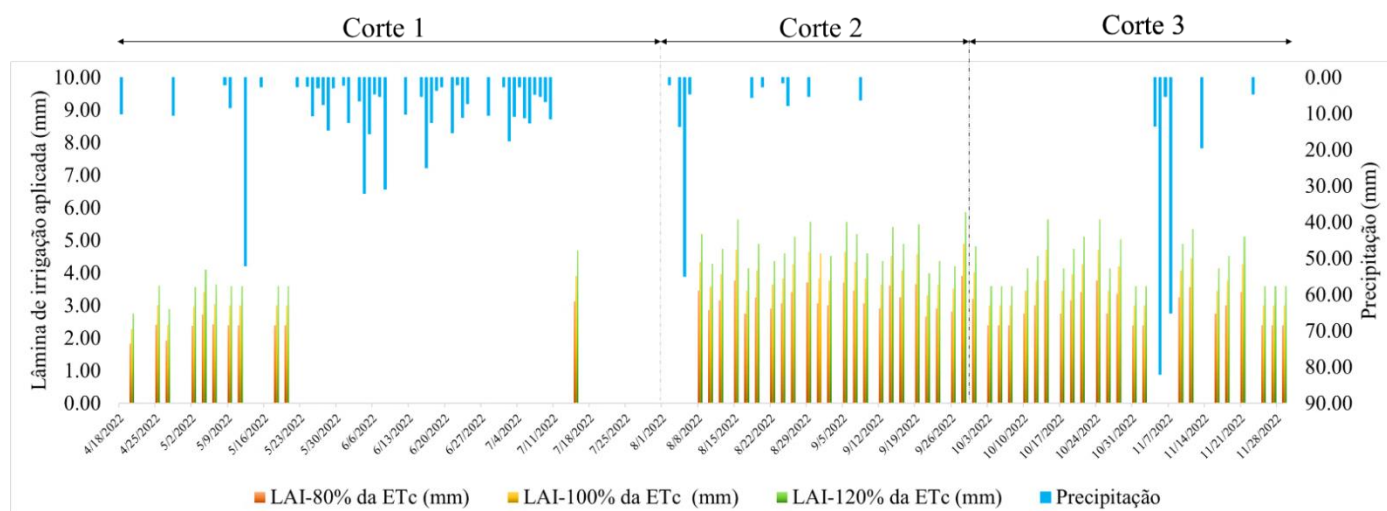


Figura 2. Dados de precipitação e lâminas de irrigação aplicadas (80, 100 e 120% da ETc) ao longo dos três ciclos do sorgo.

Em relação ao número de dias consecutivos sem precipitação (DCSP), foram observados para os três cortes, 9, 22 e 34 dias, respectivamente. Quanto aos dias chuvosos, foi verificado, com base em diferentes limiares de precipitação, a variação de 2 a 52 mm com 42 dias chuvosos (corte 1); 1,5 a 55 mm com 10 dias chuvosos (corte 2); e 4,5 a 82 mm com 6 dias chuvosos (corte 3).

A evapotranspiração de referência (ET_o) apresentou resultados variando de 1,70 a 5,36 mm dia⁻¹ (corte 1), 4,46 a 6,71 mm dia⁻¹ (corte 2) e 4,73 a 6,46 mm dia⁻¹ (corte 3), com valores acumulados de 70,0; 133,16 e 95,97 mm para os três cortes estudados, respectivamente, com média de 99,71 mm corte⁻¹. As lâminas correspondentes aos tratamentos de 80, 100 e 120% da ET_c totalizaram 26,65; 33,06; 39,67 mm (corte 1), 77,66; 97,07 e 116,48 mm (corte 2) e 63,98; 79,97 e 95,96 mm (corte 3).

3.2 Avaliação da fração solo

Os Boxplots (Figura 3) mostram os resultados da condutividade elétrica (CE), carbono orgânico total (COT) e umidade do solo (Θ_g) nas profundidades de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m para os três cortes e entre os tratamentos estudados.

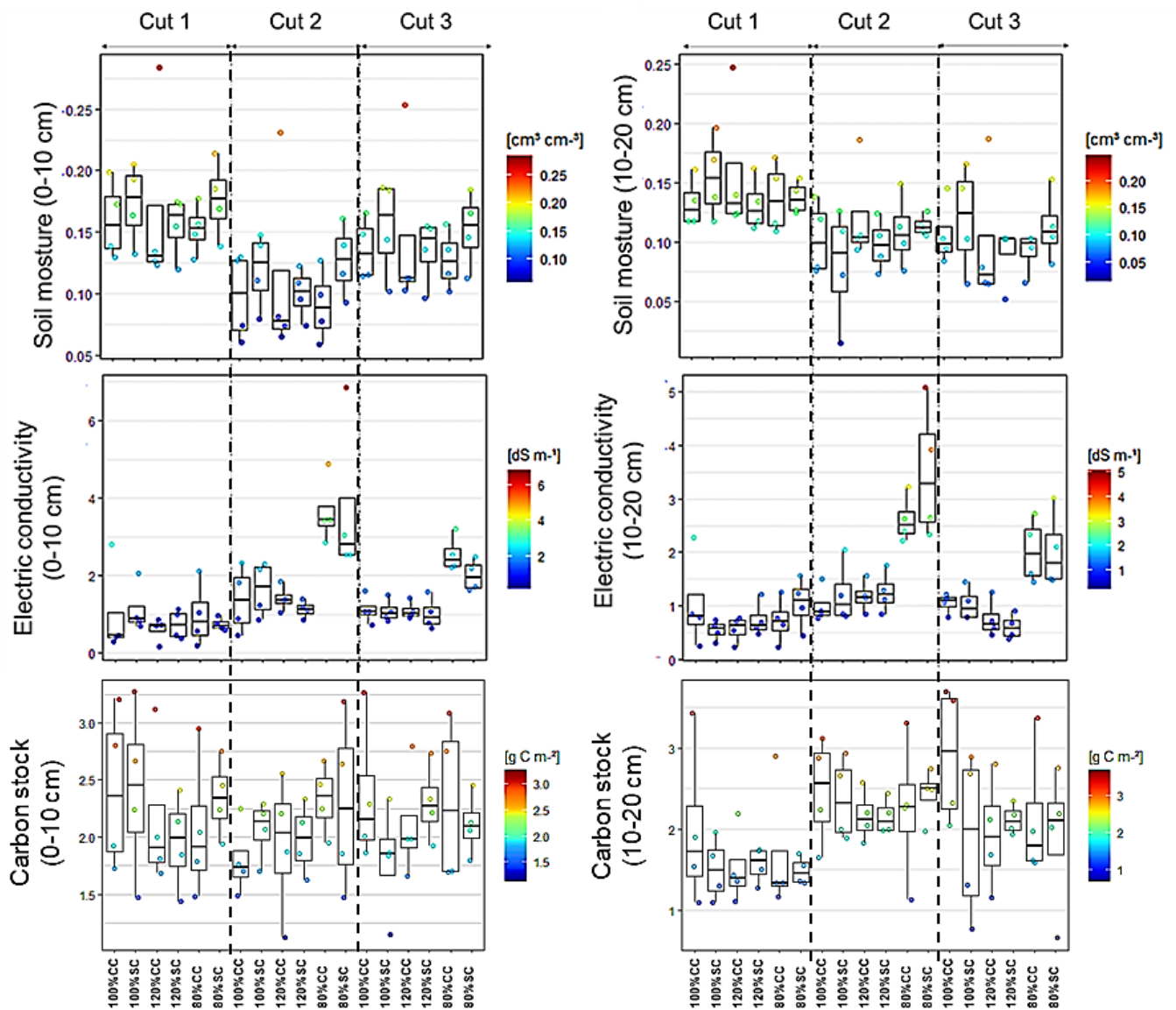


Figura 3. Boxplots das variáveis de solo: umidade do solo (0-0,10 m) (a); umidade do solo (0,10-0,20 m) (b); condutividade elétrica do solo (0-0,10 m) (c);

condutividade elétrica do solo (0,10-0,20 m) (d); estoque de carbono (0-0,10 m) (e);
estoque de carbono (0,10-0,20 m) (f)

Na Tabela 3 observa-se que, no corte 1, não foi verificada diferença estatística para nenhum dos parâmetros estudados, conforme o teste Tukey ($p \leq 0,05$). Nos cortes 2 e 3, a umidade do solo e o carbono orgânico total, semelhante ao que ocorreu no corte 1, apresentaram resultados uniformes dentro dos tratamentos, não diferindo estatisticamente ($p \leq 0,05$).

Tabela 3. Resultado da análise de variância das variáveis de solo

Cortes	Fator de variação	Umidade do solo		Condutividade elétrica		Estoque de carbono	
		(0-10 cm)	(10-20 cm)	(0-10 cm)	(10-20 cm)	(0-10 cm)	(10-20 cm)
Corte 1	Lâmina de irrigação	0.9808 ^{ns}	0.9074 ^{ns}	0.7432 ^{ns}	0.7697 ^{ns}	0.7259 ^{ns}	0.8699 ^{ns}
	Cobertura morta	0.5766 ^{ns}	0.8610 ^{ns}	0.9493 ^{ns}	0.9878 ^{ns}	0.8626 ^{ns}	0.2590 ^{ns}
	Lâm. de irrigação x Cob. morta	0.6075 ^{ns}	0.1195 ^{ns}	0.6010 ^{ns}	0.1340 ^{ns}	0.1340 ^{ns}	0.5122 ^{ns}
Corte 2	Lâmina de irrigação	0.9955 ^{ns}	0.6181 ^{ns}	0.0061 ^{**}	0.0012 ^{**}	0.4613 ^{ns}	0.7139 ^{ns}
	Cobertura morta	0.3278 ^{ns}	0.2616 ^{ns}	0.9523 ^{ns}	0.0822 ^{ns}	0.5318 ^{ns}	0.8981 ^{ns}
	Lâm. de irrigação x Cob. morta	0.4101 ^{ns}	0.5424 ^{ns}	0.8868 ^{ns}	0.2570 ^{ns}	0.6460 ^{ns}	0.7765 ^{ns}
Corte 3	Lâmina de irrigação	0.9955 ^{ns}	0.6181 ^{ns}	0.0061 ^{**}	0.0012 ^{**}	0.4613 ^{ns}	0.7139 ^{ns}
	Cobertura morta	0.3278 ^{ns}	0.2616 ^{ns}	0.9523 ^{ns}	0.0822 ^{ns}	0.5318 ^{ns}	0.8981 ^{ns}
	Lâm. de irrigação x Cob. morta	0.4101 ^{ns}	0.5424 ^{ns}	0.8868 ^{ns}	0.2570 ^{ns}	0.6460 ^{ns}	0.7765 ^{ns}

^{ns} – Não significativo a 5% de probabilidade; * – Significativo a 5% de probabilidade

No entanto, a condutividade elétrica, nas duas camadas, apresentou diferença estatística dentro das parcelas (lâminas de irrigação). No ciclo 2, observa-se que a lâmina referente a 80% da ETc, nas duas profundidades estudadas,

apresentou uma CE média de 3,60 dS m⁻¹ e 3,06 dS m⁻¹, respectivamente. Enquanto no ciclo 3, houve uma redução de 61.6% (2,28 dS m⁻¹) e 63.3% (2,03 dS m⁻¹). Essa redução pode estar associada a uma precipitação intensa (82 mm) que ocorreu no dia 05 de novembro.

3.3 Crescimento e produtividade das culturas

A Figura 4 apresenta a análise dos Boxplots das variáveis biométricas da cultura do sorgo. As variáveis consideradas foram: área foliar, índice de área foliar, rendimento de massa fresca e rendimento de massa seca, para os três cortes estudados.

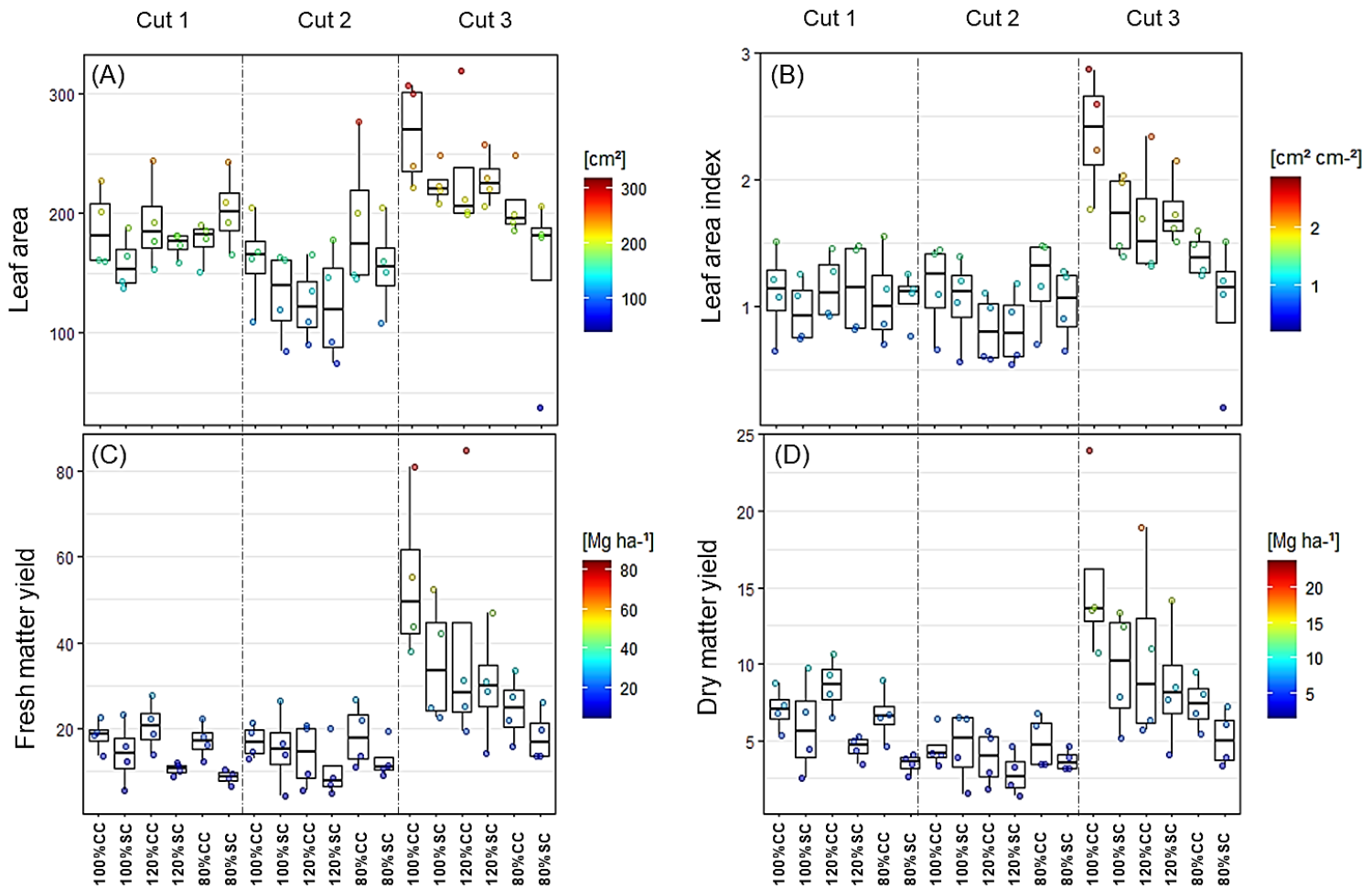


Figura 4. Boxplots das variáveis biométricas do sorgo: área foliar (a); índice de área foliar (b); rendimento de matéria seca (c); rendimento de matéria fresca (c).

A área foliar (Figura 4a), nos três cortes, apresenta uma distribuição simétrica dos dados entre os tratamentos, não havendo diferença estatística, conforme teste Tukey ($p \leq 0,05$). Quanto ao índice de área foliar (Figura 4b), nos dois cortes dois e três não foi evidenciado diferença significativa entre os tratamentos, no entanto, no primeiro corte houve interação significativa dentro dos tratamentos (lâmina e cobertura), com os tratamentos de 100CC, 100SC, 120CC e 120SC não diferindo entre si e estatisticamente superiores em relação aos tratamentos que receberam a lâmina de 80% da ETc (Tabela 4). Esse

comportamento pode ser um indicativo de que as plantas possuem tamanhos de folhas diferentes, mas estão distribuídas de maneira semelhante no espaço, resultando em uma área foliar parecida.

Tabela 4. Resultado da análise de variância das variáveis da cultura do sorgo

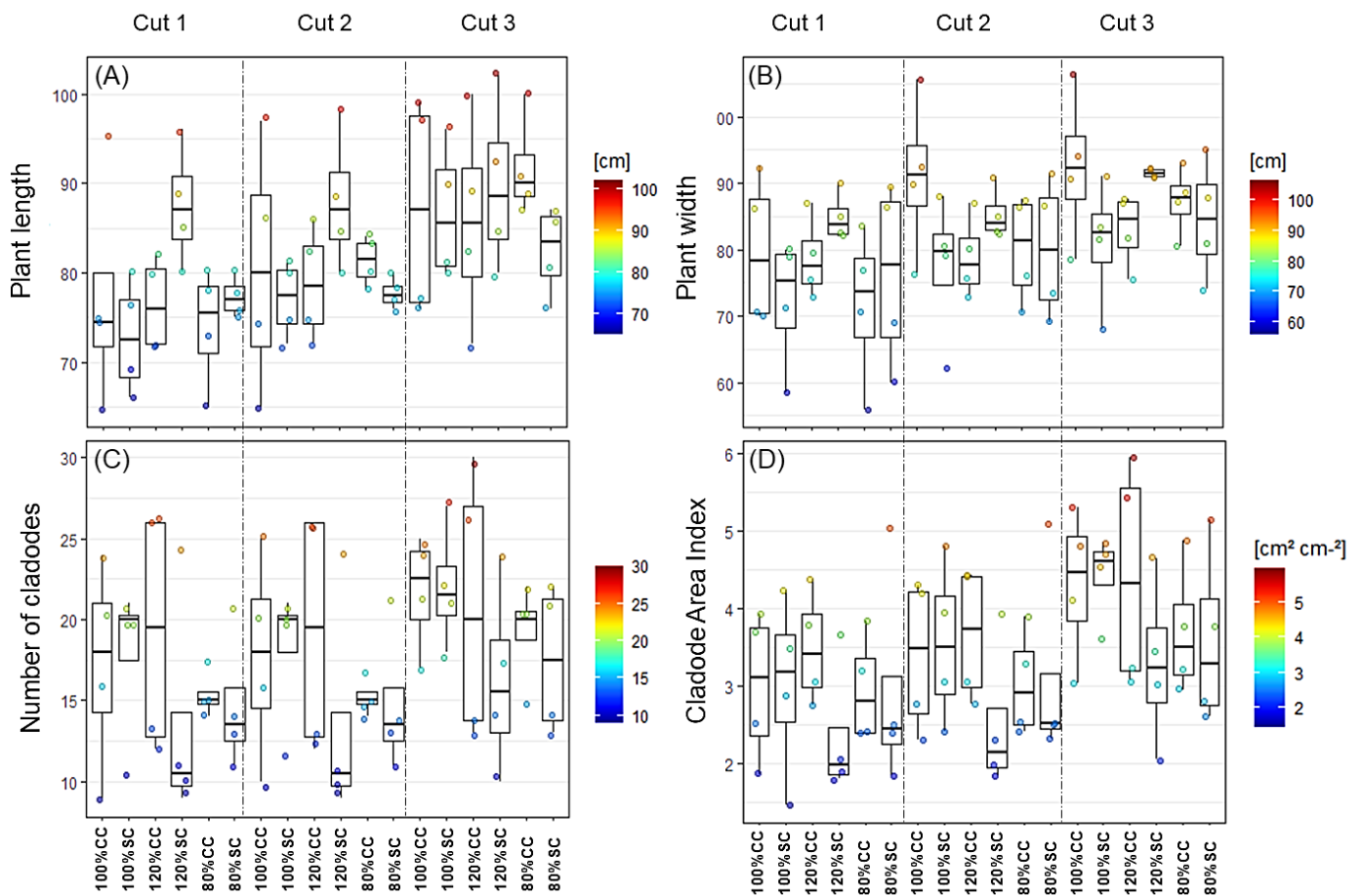
Cortes	Fator de variação	Área foliar	Índice de área foliar	Rendimento de massa seca	Rendimento de massa fresca
Corte 1	Lâmina de irrigação	0.4970 ^{ns}	0.0435 [*]	0.2994 ^{ns}	0.4600 ^{ns}
	Cobertura morta	0.082 ^{ns}	0.0035 ^{**}	0.0028 ^{**}	0.0015 ^{**}
	Lâm. de irrigação x Cob. morta	0.3228 ^{ns}	0.8522 ^{ns}	0.2639 ^{ns}	0.3593 ^{ns}
Corte 2	Lâmina de irrigação	0.6719 ^{ns}	0.8878 ^{ns}	0.5785 ^{ns}	0.6175 ^{ns}
	Cobertura morta	0.5039 ^{ns}	0.4923 ^{ns}	0.1543 ^{ns}	0.1073 ^{ns}
	Lâm. de irrigação x Cob. morta	0.1099 ^{ns}	0.6484 ^{ns}	0.4999 ^{ns}	0.7334 ^{ns}
Corte 3	Lâmina de irrigação	0.1734 ^{ns}	0.1573 ^{ns}	0.0406 [*]	0.0101 [*]
	Cobertura morta	0.2606 ^{ns}	0.2311 ^{ns}	0.1023 ^{ns}	0.1835 ^{ns}
	Lâm. de irrigação x Cob. morta	0.7406 ^{ns}	0.8469 ^{ns}	0.6445 ^{ns}	0.8154 ^{ns}

^{ns} – Não significativo a 5% de probabilidade; ^{*} – Significativo a 5% de probabilidade

Nos cortes 1 e 3, observamos diferenças estatísticas significativas para a variável de rendimento de massa fresca, conforme ilustrado na Figura 4c. No corte 1, a diferença estatística foi encontrada entre as subparcelas com e sem cobertura morta, com valores de rendimento de massa fresca de 18,44 e 28,32 Mg h⁻¹ com cobertura morta, e 11,56 e 21,14 Mg h⁻¹ sem cobertura morta. No corte 3, a diferença estatística foi observada na parcela referente à lâmina de irrigação. Quanto ao rendimento de massa seca (Figura 4d), também houve efeito significativo das subparcelas, com valores de 7,33 e 8,11 Mg h⁻¹ com cobertura

morta e 4,72 e 5,89 Mg h⁻¹ sem cobertura morta no corte 1, assim como na parcela da lâmina de irrigação no corte 3, semelhante ao observado para o rendimento de massa fresca. No corte 2, não foi encontrada diferença estatística para os rendimentos de massa seca e fresca.

A Figura 5 apresenta a análise dos Boxplots das variáveis biométricas da cultura da palma. As variáveis consideradas foram: a altura da planta (PL), largura da planta (PW), número total de cladódios (NC) e índice de área do cladódio (CAI) nos três cortes estudados. Foi avaliado também o rendimento de massa fresca (FMY_Cactus) e seca (FMY_Cactus) da cultura da palma (Figura 6). Esses dois parâmetros foram analisados aos 18 meses após o plantio, coincidindo o corte final da cultura do sorgo.



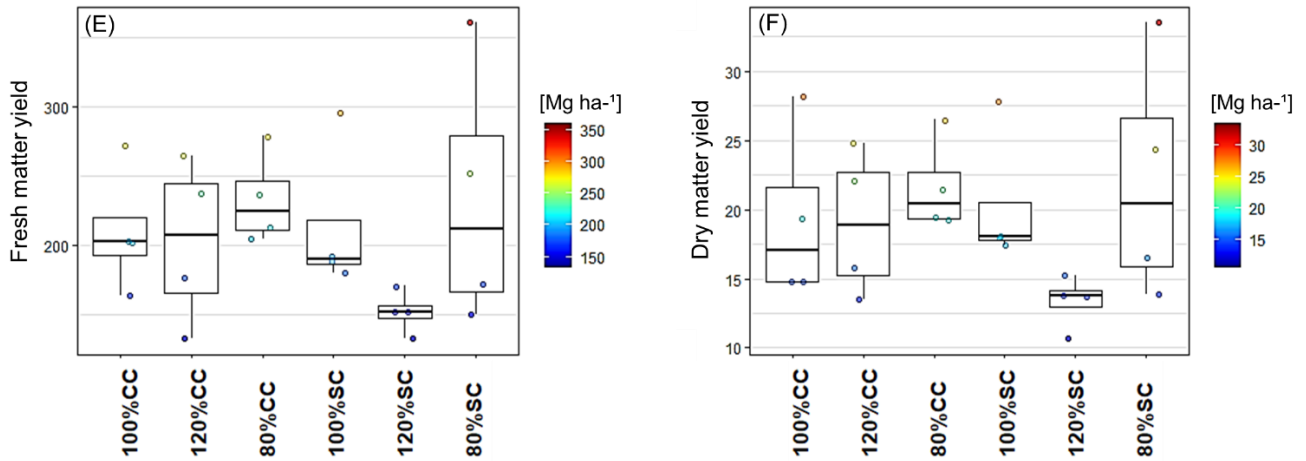


Figura 5. Boxplots das variáveis biométricas da palma: comprimento da planta (a); largura de planta (b), número de cladódios (c), índice de área de cladódios (d) e variáveis produtivas: rendimento de matéria fresca (e), rendimento de matéria seca (f).

De acordo com teste Tukey ($p \leq 0,05$), as variáveis comprimento da planta (Figura 5a), largura da planta (Figura 5b), número total de cladódios (Figura 5c) e índice de área do cladódio (Figura 5d) não apresentaram diferença significativa. No entanto, para os rendimentos de massa fresca (Figura 5e) e massa seca (Figura 5f) da palma forrageira foram verificadas diferença significativa para o fator lâmina de irrigação, conforme Tabela 5.

Tabela 5. Resultado da análise de variância das variáveis da cultura da palma

Cortes	Fator de variação	Comprimento da planta	Largura da planta	Índice de área do cladódio	Rendimento de massa seca	Rendimento de massa fresca
Corte 1	Lâmina de irrigação	0.086 ^{ns}	0.2591 ^{ns}	0.9814 ^{ns}	-	-
	Cobertura morta	0.3396 ^{ns}	0.8146 ^{ns}	0.1734 ^{ns}	-	-
	Lâm. de irrigação x Cob. morta	0.2010 ^{ns}	0.4081 ^{ns}	0.1699 ^{ns}	-	-
Corte 2	Lâmina de irrigação	0.1938 ^{ns}	0.6641 ^{ns}	0.6081 ^{ns}	-	-
	Cobertura morta	0.8194 ^{ns}	0.5671 ^{ns}	0.2663 ^{ns}	-	-
	Lâm. de irrigação x Cob. morta	0.2208 ^{ns}	0.1721 ^{ns}	0.1145 ^{ns}	-	-
Corte 3	Lâmina de irrigação	0.9798 ^{ns}	0.9061 ^{ns}	0.3953 ^{ns}	0.0271*	0.0305*
	Cobertura morta	0.5149 ^{ns}	0.5975 ^{ns}	0.3710 ^{ns}	0.5498 ^{ns}	0.5231 ^{ns}
	Lâm. de irrigação x Cob. morta	0.2061 ^{ns}	0.1119 ^{ns}	0.4480 ^{ns}	0.4421 ^{ns}	0.5805 ^{ns}

^{ns} – Não significativo a 5% de probabilidade; * – Significativo a 5% de probabilidade

Complementar à análise das variáveis biométricas apresentadas separadamente, os rendimentos de massa fresca e seca resultante do consórcio sorgo-palma também foram analisados (Figura 6).

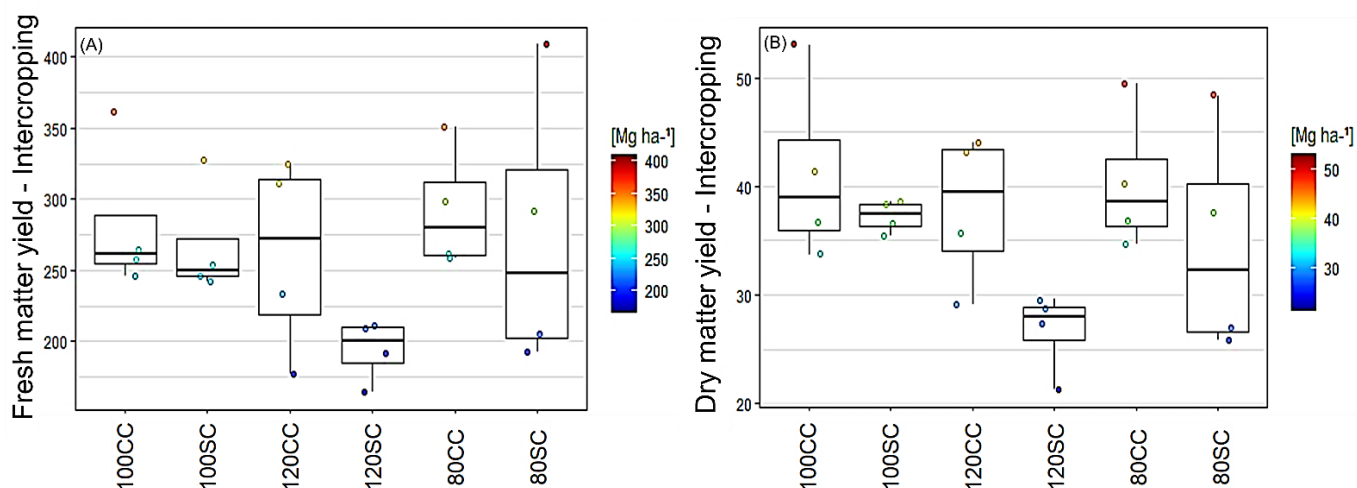


Figura 6. Boxplots das variáveis produtivas do consórcio sorgo-palmeira: rendimento de matéria fresca do consórcio (a), rendimento de matéria seca do consórcio (b).

Na tabela 5, verifica-se que a produtividade de massa fresca total resultante do consórcio (sorgo-palma) (6a) não apresentou diferença estatística ($p \leq 0,05$) para a cobertura e para interação entre os fatores (lâmina e cobertura morta), somente foi verificado diferença estatística para o fator lâmina de irrigação. Para produtividade de massa seca total (6b), foi verificado efeito significativo do fator isolado lâmina de irrigação, e para o fator cobertura morta, onde a subparcela CC ($42,96 \text{ Mg h}^{-1}$) apresentou melhores resultados quando comparada com a SC ($34,68 \text{ Mg h}^{-1}$). Não foi verificado diferença estatística para a interação entre os fatores.

Tabela 6. Resultado da análise de variância das variáveis resultantes do consórcio

	Fator de variação	Rendimento de massa seca	Rendimento de massa fresca
Consórcio	Lâmina de irrigação	0.0283 [*]	0.0432 [*]
	Cobertura morta	0.0381 [*]	0.1878 ^{ns}
	Lâm. de irrigação x Cob. morta	0.6704 ^{ns}	0.6514 ^{ns}

^{ns} – Não significativo a 5% de probabilidade; ^{*} – Significativo a 5% de probabilidade

3.4 Análises de componentes principais (PCA's)

Os resultados obtidos das análises do solo: umidade do solo nas profundidades de 0-0,10 m (SM-D1) e 0,10-0,20 m (SM-D2); condutividade elétrica (EC), estoque de carbono nas profundidades de 0-0,10 m (CS-D1) e 0,10-0,20 m (CS-D2), das plantas: índice de área foliar (LAI), rendimento de massa seca do sorgo (DMY_Shorgum), rendimento de massa fresca do sorgo (FMY_Shorgum) e

índice de área do cladódio (CAI) para os cortes 1 e 2 e 3 foram submetidos a análise de componentes principais (Figura 6).

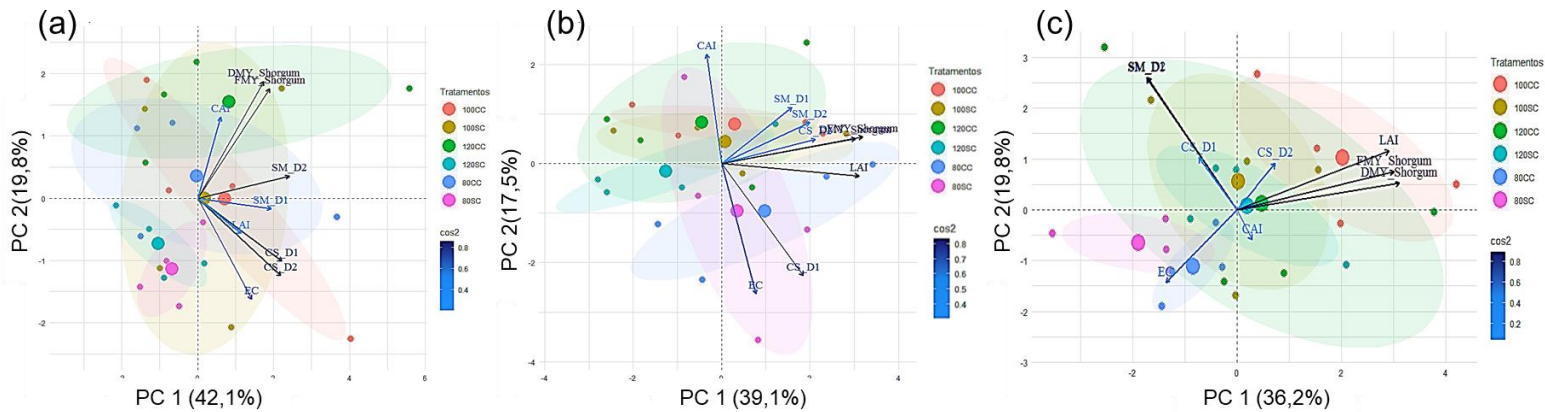


Figura 6. Análise dos componentes principais das variáveis: umidade do solo (SM) (0-0,10 m); umidade do solo (SM) (0,10-0,20 m); condutividade elétrica do solo (EC) (0 – 0,20 cm); estoque de carbono (SC) (0-0,10 m); estoque de carbono (SC) (0,10-0,20 m); índice de área foliar (LAI); índice de área de cladódios (CAI), rendimento de matéria fresca (FMY_Shorgum), rendimento de matéria seca (DMY_Shorgum), utilizando os componentes principais 1 (CP1) e 2 (CP2) para os cortes 1 e 2 e 3 (a, b e c)

No corte 1 (Figura 6a), é possível evidenciar que o tratamento que recebe a lâmina de 80% da ETC sem a presença da cobertura morta (80SC) possui forte relação com as variáveis LAI, SM-D1, EC e CS nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, enquanto a produtividade de massa seca e fresca são inversamente proporcionais a CE do solo e diretamente proporcionais a SM-D2. No corte 2 (Figura 6b), semelhante ao que aconteceu no corte anterior, a produtividade de massa seca e fresca continuam apresentando proporcionalidade positiva com CS-D2 e a SM-D2, observa-se também a forte correlação entre as variáveis LAI, FMY_Shorgum e DMY_Shorgum. Ainda no ciclo 2, nota-se também que o

tratamento de 80% da ETc com aplicação de cobertura morta (80CC) interferiu positivamente no LAI.

A Figura 6c corresponde à análise de componentes principais referente ao corte 3. Semelhante ao que aconteceu no corte anterior, verifica-se uma alta correlação entre as variáveis LAI, FMY_Shorgum e DMY_Shorgum, permitindo a modelagem de uma equação para estimar a variável considerada de mais difícil acesso com base nas demais. A tabela 7 apresenta os resultados obtidos das análises de componentes principais. Nela estão apresentados a contribuição de cada variável analisada, as variâncias das componentes principais 1 e 2, a variância total, bem como os valores correspondentes aos autovalores da PC1 e PC2.

Tabela 7. Resultados da análise de componentes principais associados às variáveis do solo e das plantas para os três cortes

	Corte 1		Corte 2		Corte 3	
	PC 1	PC 2	PC 1	PC 2	PC 1	PC 2
SM-D1 (cm ³ cm ⁻³)	12,68	0,2	5,76	6,56	8,29	33,6
SM-D2 (cm ³ cm ⁻³)	19,68	0,89	9,01	3,45	8,17	34,04
EC (dS m ⁻¹)	6,82	18,9	1,38	35,09	5,14	10,26
CS-D1 (g kg ⁻¹)	16,53	7,3	7,78	25,95	1,49	5,19
CS-D2 (g kg ⁻¹)	16,18	11,11	10,18	1,22	1,48	4,2
LAI (cm ² cm ⁻²)	4,42	2,29	21,85	0,31	23,44	6,75
FMY-sorgo (Mg ha ⁻¹)	10,23	25,15	20,73	1,3	26,75	1,36
DMY-sorgo (Mg ha ⁻¹)	12,24	22,06	23,04	1,49	25,01	2,84
CAI (cm ² cm ⁻²)	1,23	12,09	0,26	24,61	0,24	1,75
Eigenvalor	3,79	1,79	3,52	1,57	3,26	1,79
Variance (%)	42,15	19,84	39,12	17,47	36,20	19,85
Cumulative variance (%)	42,15	61,98	39,12	56,59	36,20	56,05

Observa-se que as componentes principais 1 (CP1) e 2 (CP2), nos três cortes estudados, explicaram 68,98; 56,59 e 56,05%, respectivamente, da variância total. Em todos os casos, foi obedecido o critério de Kaiser (1960), onde este sugere que se deve considerar somente as componentes com autovalor maior do que 1, pois este contribui significativamente para a explicação da variância.

Na Figura 7 está apresentado a análise de componentes principais referente aos cultivos: rendimento de massa fresca do sorgo (FMY_Shorgum); rendimento de massa seca do sorgo (DMY_Shorgum); rendimento de massa fresca da palma (FMY_Cactus); rendimento de massa seca da palma (DMY_Cactus); rendimento de massa fresca resultante do consórcio (FMY_Interc) e rendimento de massa seca resultante do consórcio (DMY_Interc); e referente ao solo: umidade do solo nas profundidades de 0-0,10 m (SM-D1) e 0,10-0,20 m (SM-D2); condutividade elétrica (EC), estoque de carbono nas profundidades de 0-0,10 m (CS-D1) e 0,10-0,20 m (CS-D2).

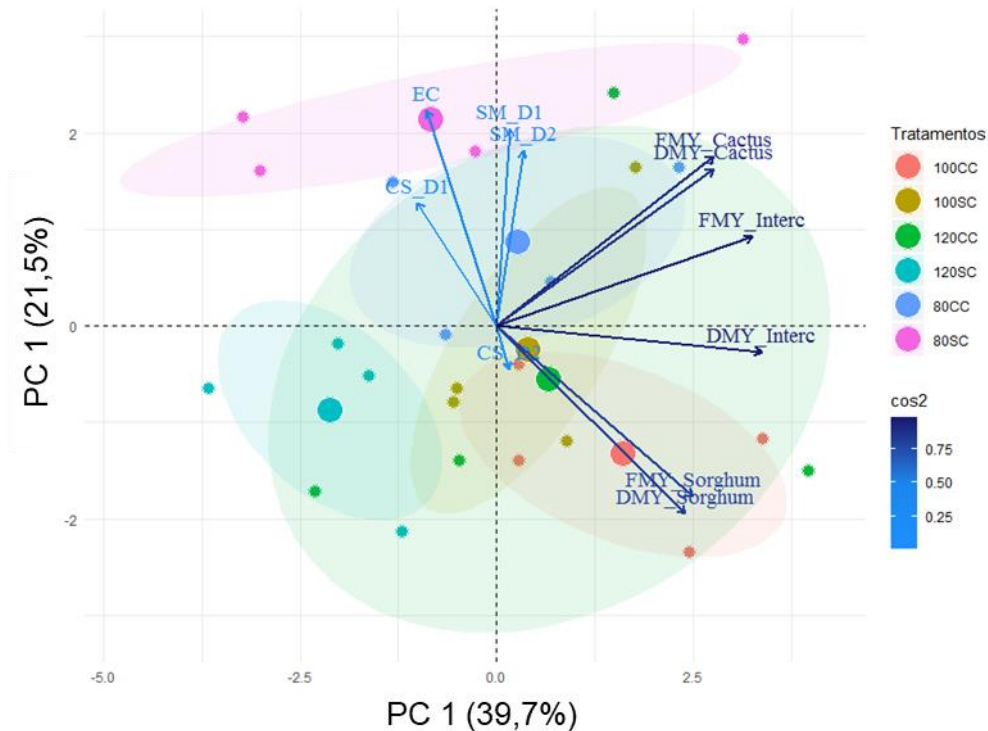


Figura 7. Análise dos componentes principais das variáveis: rendimento de massa fresca do sorgo (FMY_Shorgum); rendimento de massa seca do sorgo (DMY_Shorgum); rendimento de massa fresca da palma (FMY_Cactus); rendimento de massa seca da palma (DMY_Cactus); rendimento de massa fresca resultante do consórcio (FMY_Interc) e rendimento de massa seca resultante do consórcio (DMY_Interc); e referente ao solo: umidade do solo nas profundidades de 0-0,10 m (SM-D1) e 0,10-0,20 m (SM-D2); condutividade elétrica (EC), estoque de carbono nas profundidades de 0-0,10 m (CS-D1) e 0,10-0,20 m (CS-D2).

Verifica-se que o rendimento de massa seca e fresca resultante do consórcio apresentou forte correlação com o tratamento correspondente a lâmina de irrigação de 80% com cobertura morta. Os benefícios dessa forte correlação podem incluir o melhor aproveitamento dos recursos hídricos, conservação do solo em decorrência da utilização da cobertura morta e a resiliência frente as mudanças climáticas.

A tabela 8 apresenta os resultados obtidos das análises de componentes principais. Nela estão apresentados a contribuição de cada variável analisada, as variâncias das componentes principais 1 e 2, a variância total, bem como os valores correspondentes aos autovalores da PC1 e PC2. Observa-se que as componentes principais 1 (CP1) e 2 (CP2), explicaram 61,25% da variância total, além disso, foi obedecido o critério de Kaiser (1960), onde este sugere que se deve considerar somente as componentes com autovalor maior do que 1, pois este contribui significativamente para a explicação da variância.

Tabela 8. Resultados da análise de componentes principais associados às variáveis do solo e as resultantes do consórcio

	PC 1	PC 2
SM_D1	0,06	14,91
SM_D2	0,23	11,89
EC	1,54	17,87
CS_D1	1,99	5,82
CS_D2	0,05	0,73
DMY_Sorghum	11,29	13,62
FMY_Sorghum	12,15	11,25
FMY_Cactus	14,89	11,06
DMY_Cactus	14,89	9,53
FMY_Interc	20,68	3,06
DMY_Interc	22,23	0,26
eigenvalue	4,37	2,37
variance,percent	39,72	21,53
cumulative,variance,percent	39,72	61,25

A Figura 8 corresponde à análise de componentes principais das variáveis do solo (SM, EC, CS, nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm), variáveis biométricas (LAI, CAI, FMY_Shorgum e DMY_Shorgum), conforme visto anteriormente, e as

variáveis hidrológicas: dias consecutivos sem chuva (NCDWP), número de dias de chuva (NRD), precipitação total (TP) e precipitação máxima (MP).

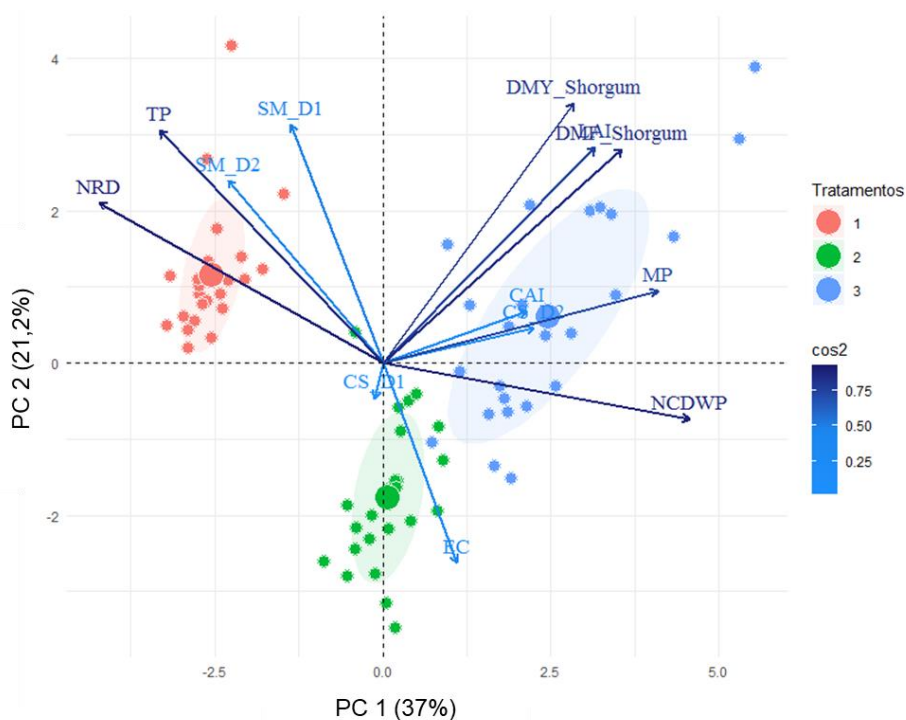


Figura 8. Análise de componentes principais referentes as variáveis umidade do solo (SM) (0-0,10 m); umidade do solo (SM) (0,10-0,20 m); condutividade elétrica do solo (EC) (0 – 0,20 cm); estoque de carbono (SC) (0-0,10 m); estoque de carbono (SC) (0,10-0,20 m); índice de área foliar (LAI); índice de área de cladódios (CAI), rendimento de matéria fresca (FMY_Shorgum), rendimento de matéria seca (DMY_Shorgum); número de dias consecutivos sem chuva (NCDWP), número de dias chuvosos (NRD), precipitação total (TP) e precipitação máxima (MP).

A PCA com as variáveis de solo, plantas e hidrológicas (Figura 8) mostrou que a precipitação total (TP) e o número de dias de chuva (NRD) e a umidade do solo (SM) nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm apresentam forte relação com o corte 1 que ocorreu entre os meses de abril a julho de 2022 (período chuvoso),

além da inversa proporcionalidade com a CE do solo. Nos cortes 2 e 3, a CE do solo apresentou relação positiva com o número de dias consecutivos sem chuva (NCDWP) e inversamente proporcional à precipitação total (TP) e número de dias chuvosos (NRD), outro comportamento verificado foi a alta correlação entre o CS-D1. Tais comportamentos reforçam a importância da chuva no controle da salinidade do solo, por meio da lixiviação dos sais.

A tabela 9 apresenta os resultados obtidos da análise de componentes principais, nela estão apresentados a contribuição de cada variável analisada, as variâncias das componentes principais 1 e 2, a variância total, bem como os valores correspondentes aos autovalores da PC1 e PC2.

Tabela 9. Resultados da análise de componentes principais associados às variáveis de solo, das plantas e hidrológicas

	PC 1	PC 2
SM_D1	1.64	14.82
SM_D2	4.59	8.7
EC	1.06	10.4
CS_D1	0.01	0.32
CS_D2	4.4	0.33
LAI	8.63	12.14
DMY_Shorgum	6.97	17.63
DMF_Shorgum	11.01	11.95
CAI	4.02	0.71
NRD	15.41	6.68
NCDWP	18.11	0.82
TP	9.58	14.13
MP	14.56	1.37
eigenvalue	4.81	2.76
variance,percent	36.98	21.23
cumulative,variance,percent	36.98	58.22

Observa-se que as componentes principais 1 (CP1) e 2 (CP2) explicaram 58.22%, da variância total, além disso, foi obedecido o critério de Kaiser (1960).

Considerando a alta correlação entre as variáveis LAI, FMY_Shorgum e DMY_Shorgum, foram utilizados dois modelos, regressão linear múltipla (RLM) e Randon Forest (RF), para estimar o parâmetro que possui maior dificuldade de obtenção, que neste caso foi o IAF. A tabela 6, apresenta os coeficientes da equação modelada para estimar o índice de área foliar.

Tabela 10, Coeficientes da equação de regressão linear múltipla,

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>
Interseção	0,560629	0,073889
PMS	0,121579	0,039785
PMF	-0,0008	0,011148

O modelo Randon Forest, mesmo com um quantitativo limitado de dados, também apresentou resultados bem promissores, A Figura 9 traz a avaliação dos dois modelos estudados. A regressão linear múltipla (0,65) (Figura 9a) apresentou um coeficiente de determinação menor que o modelo Random Forest (0,75) (Figura 9b), todavia, ambos apresentaram valores de RMSE e MAE baixos, o que mostra que os dois modelos são eficientes na estimativa do LAI com base nos rendimentos de massa seca e fresca do sorgo.

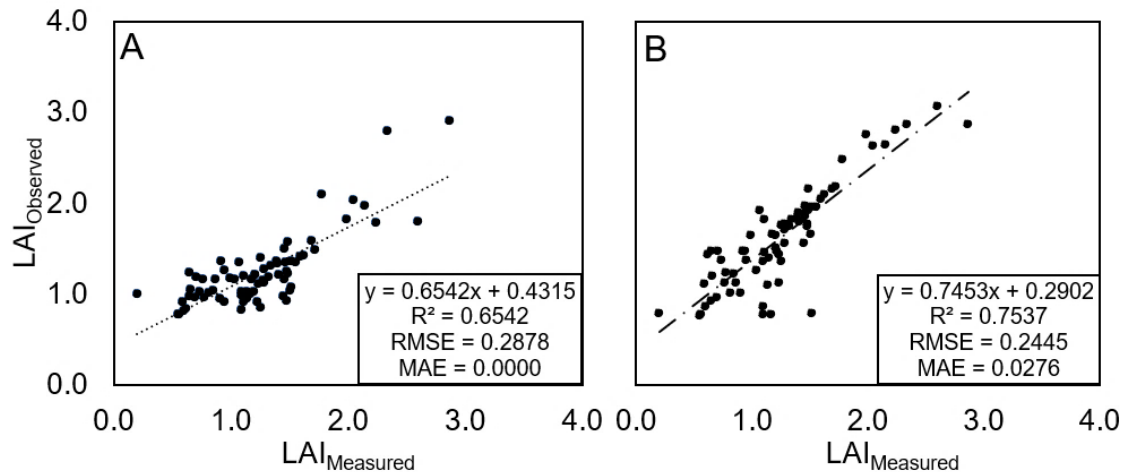


Figura 9. Desempenho dos modelos MLR (a) e RF (b) na estimativa do índice de área foliar do sorgo.

4. Discussão

4.1 Estudo hidrológico e controle da salinidade do solo

Entender a dinâmica hidrológica de uma região é crucial no processo de tomada de decisões, todavia, tais informações ainda são pouco exploradas no contexto local, como apresentado por Carvalho et al. (2020); Carvalho et al. (2020) e Santos e Farias (2017), onde os autores abordaram tais questões de forma restrita ao volume precipitado e as máximas precipitações que ocorreram em determinados períodos.

Dados de chuva e sua variação espaço temporal, são muito importantes, no entanto, associá-los a outros índices, como números consecutivos de dias sem chuva, número de dias chuvosos ajudariam a fornecer uma percepção mais ampla sobre a disponibilidade de água, o manejo hídrico e a resiliência das culturas. Alguns estudos relataram que eventos de precipitação intensa podem ocorrer na

região (Carvalho et al., 2020; Santos e Farias, 2017). Existe uma tendência de mudanças climáticas no padrão de distribuição de chuvas no Nordeste brasileiro, com redução do número de dias chuvosos e aumento do número de eventos extremos (Costa et al., 2020; Rudorff et al., 2022). O que reforça a importância da utilização do reuso de efluentes na produção agrícola da região.

Carvalho et al. (2021) estudando a produtividade do sorgo irrigado com efluente doméstico tratado, no período de novembro de 2018 a junho de 2019, reportaram que os valores acumulados de precipitação durante o período experimental, subdividido em três ciclos, foram de 23,0; 212,1 e 96,9 mm, distribuídos em 6, 9 e 7 dias chuvosos, com máximos diários de 12,5; 115,0 e 34,1 mm, respectivamente. O autor ainda destacou que a precipitação média anual total na região é de 600 mm, com valores semelhantes (648,6 mm) relatados por Pereira et al. (2017).

Esses resultados influenciam diretamente no controle da salinidade do solo, visto que, volumes consideráveis de chuva, possibilitam a lixiviação dos sais, refletindo na diminuição da concentração de salinidade nas camadas mais superficiais do solo, como mostraram Corwin e Grattan, 2018; Cucci et al. (2016); Naser et al. (2018) e Shahrokhnia e Wu, 2021), principalmente em condições em que a irrigação é feita com água residuária, como verificado por Carvalho et al. (2021), que de acordo com sua pesquisa, houve redução significativa na condutividade elétrica do solo para todos os tratamentos durante o ciclo que ocorreu eventos pluviométricos intensos.

4.2 Desempenho das culturas em relação aos tratamentos aplicados

Foi constatado que o sorgo apresentou respostas produtivas significativas quando cultivado na presença de cobertura morta, com aumento de 39,05% (63,17 Mg ha⁻¹) na produtividade de massa fresca (Figura 5c) e 38,81% (19,85 Mg ha⁻¹) na produtividade de massa seca (Figura 5d), corroborando as pesquisas de (El-Mageed et al., 2018) que verificou que o sorgo bicolor cultivado em condição de estresse hídrico apresentou melhores respostas de crescimento das plantas, produtividade, eficiência no uso da água quando submetidos a aplicação de cobertura morta (10 Mg ha⁻¹ de palha de arroz) associado a aplicação de compostos orgânicos. Seus resultados indicaram que a produção de forragem e semente foram de 41,41 e 7,8 Mg ha⁻¹ com incrementos de 11,45 e 25,8% sob essas condições.

Carvalho et al. (2020) por sua vez, estudaram o efeito associado da cobertura morta e da irrigação com esgoto tratado na cultura do sorgo. Os autores concluíram que o uso de cobertura morta promoveu maior uniformidade do crescimento do sorgo forrageiro em área irrigada com água residuária tratada, isso está associado ao fato de que o uso da cobertura morta promove a redução da evaporação do solo, conservação da umidade, controle da temperatura do solo, além de melhorar a atividade microbiana (El-Mageed et al., 2018; Lopes et al., 2019; Akhtar et al., 2020).

As componentes produtivas da palma não apresentaram diferença estatística, semelhante ao que encontraram Souza et al. (2022) em seus estudos com palma forrageira cultivada solteira e consorciada com o milho com e sem a aplicação de cobertura morta. A ausência de efeito significativo pode estar associada ao quantitativo de água que o cultivo recebeu ao longo dos três ciclos,

totalizando 888,8 mm (80% da ETc), 930,90 (100% da ETc) e 972,9 (120% da ETc), corroborando Araújo Júnior et al. (2021).

Além dos estudos relacionados à aplicação de cobertura morta e irrigação com água residuária, outras pesquisas têm sido realizadas com o intuito de maximizar a produtividade das culturas forrageiras e otimizar o uso da água. Silva et al. (2023) avaliaram como as estratégias de espaçamento, orientação de plantio, adubação nitrogenada e consórcio impactam na dinâmica de água no solo, partição da evapotranspiração e indicadores de uso da água em cultivos de palma solteira e palma-sorgo consorciado, no semiárido brasileiro. Os autores concluíram que o consórcio promoveu o maior aumento na produtividade de água, em torno de 130%. Com relação às práticas de manejo associados ao consórcio, as que apresentaram respostas mais promissoras para a otimização dos recursos hídricos foram: espaçamento de 0,10 m entre plantas de palma forrageira sob orientação Leste-Oeste, com eficiência do uso da água de 76%. O espaçamento de 0,30 m na orientação norte-sul e o espaçamento entre linhas de 1,50 m melhoram a produtividade da água em torno de 6,89 kg m⁻³.

Com relação às respostas resultantes do consórcio palma-sorgo (Figura 6) a produtividade de massa seca apresentou efeito significativo para a subparcela, enquanto a produtividade da palma analisada separadamente não mostrou diferença estatística entre os tratamentos, comprovando que o consórcio apresenta benefícios incontestáveis quanto a otimização da produção por unidade de área, reforçando o que encontraram Silva et al. (2023).

4.3 Influência dos tratamentos aplicados sobre as propriedades do solo e das plantas

A análise de componentes principais (PCA) referente ao primeiro corte (Figura 7a) mostrou que o tratamento de 80SC (80% da ETc sem aplicação de cobertura morta) apresentou forte relação com a condutividade elétrica do solo (EC). Isso ocorre devido à aplicação de déficit hídrico associada à ausência da cobertura favorecer o processo de evaporação do solo, atuando diretamente na concentração dos sais nas camadas mais superficiais. A presença de cobertura morta no solo permite a redução no quantitativo de água de irrigação, além de contribuir na manutenção da umidade do solo e controle da salinidade devido à redução das taxas de evaporação do solo e por consequência da concentração de sais (Montenegro et al., 2013; Barakat et al., 2020; Du et al., 2022; Ma et al., 2022)

Ainda no corte 1, verificou-se que a produtividade de massa seca e fresca do sorgo são inversamente proporcionais a EC do solo, apesar da cultivar possui como característica a boa resistência a salinidade (IPA, 2007), pesquisas verificaram decréscimo da produtividade da cultura em solos salinos (Ashenafi et al., 2019) verificaram que o Sorgo Sudão, quando sofreu uma redução de 45% da matéria seca, quando cultivado em solo salino. El-Mageed et al. (2018) estudando os efeitos da interação entre a salinidade do solo e da profundidade do lençol freático nas propriedades do solo e na produção de sorgo bicolor, concluiu que o aumento nos níveis de salinidade do solo acarretou a redução significativa das variáveis de crescimento e rendimento da cultura. Segundo Adilakshmi et al. (2018) o aumento da salinidade implica na diminuição das taxas de respiração do solo, isso acontece devido ao aumento do estresse osmótico ocasionado pelas grades

concentrações de sais na solução do solo, o que reflete na redução da atividade microbiana e por consequência na redução da produtividade.

Nos cortes 2 (Figura 7b) foi verificado que a resposta produtiva do sorgo apresentou relação positiva com a CS-D2 e a SM-D2, diferente do encontrado por Carvalho et al. (2021), no entanto, a correlação da produtividade do sorgo com os teores de carbono orgânico e umidade na camada de 0-0,20 m pode estar associadas a fração do solo onde se concentra o maior percentual de raízes absorventes. Conforme Liang et al. (2017), o sistema radicular do sorgo pode chegar até a 1,5 m de profundidade, no entanto, cerca de 80% se concentram até 30 cm de profundidade no solo. Também foi verificado que as variáveis LAI, FMY_Shorgum e DMY_Shorgum possuem forte correlação entre elas, permitindo o ajuste de um modelo que permita a estimativa da variável considerada mais inacessível com base nas demais. Foi verificado ainda que o tratamento 80CC (80% da ETc com aplicação de cobertura morta) interferiu positivamente no LAI. No cenário de mudanças climáticas, a busca por metodologias e tecnologias que visem diminuir a pressão sobre os recursos hídricos tem impulsionado inúmeras pesquisas. A aplicação de lâminas de irrigação deficitária tem apresentado excelentes respostas, como mostraram Silva et al. (2023); Gano et al. (2021) e Jahansouz et al. (2014). Essa resposta possibilita ao produtor uma economia de recursos hídricos e energia sem afetar as respostas produtivas da cultura, além de garantir o aporte de cobertura morta com o material remanescente da cultura do sorgo.

No corte 3, os resultados obtidos para o consórcio irrigado com efluente doméstico tratado, com a recomendação do tratamento 80CC (80% da ETc com aplicação de cobertura morta), refletem inúmeros benefícios no quesito

sustentabilidade. Segundo Meneguzzo e Zabini, (2021) a utilização das fontes de água subaproveitadas, com destaque para as águas residuais, para a irrigação de culturas, apresenta uma oportunidade significativa na preservação dos recursos hídricos. Além de permitir uma economia de água doce, essa prática contribui para a redução da entrada de fertilizantes e evita a contaminação de corpos d'água devido a descargas externas.

A adoção do reúso de águas residuais para a fertirrigação em campos agrícolas, viabilizada por meio de tecnologias eficientes, traz consigo uma série de benefícios sociais, ecológicos, ambientais e climáticos. Esses benefícios são especialmente acentuados em regiões semiáridas. Associado ao reúso, a utilização de irrigação deficitária e a aplicação de cobertura morta configura-se é uma prática vantajosa ao produtor, pois podem melhorar a eficiência do uso da água e o fornecimento de nutrientes as plantas, além de impactar positivamente as características microbiológicas e pós-colheita de cultura (Sena et al., 2020).

Soni et al. (2021) verificaram que a irrigação deficitária (60% ET_c), com água salina, e a cobertura morta com palha de arroz apresentaram maiores valores de índice de saúde do solo em cultivo de sorgo consorciado com o milho nas regiões semiáridas da Índia. Os autores concluíram que mencionado apresentou o maior potencial para manter a saúde do solo, economizando água doce para irrigação sem afetar a produtividade do sistema sorgo-trigo.

4.4 Influência dos componentes hidrológicos sobre as propriedades do solo nos três cortes estudados

A PCA com os índices hidrológicos e as variáveis de solo monitoradas durante os três cortes (Figura 7d) mostrou que a precipitação total (TP) e o número de dias chuvosos (NRD) apresenta forte relação com o corte 1 que ocorreu entre os meses de abril a julho de 2022, o que corresponde ao período chuvoso, como já foi reportado por Carvalho et al. (2021). Foi verificado também uma inversa proporcionalidade com a CE do solo. Nos cortes 2 e 3 a CE do solo apresenta relação positiva com o número de dias consecutivos sem chuva (NCDWP) e inversa proporcionalidade com a precipitação total (TP) e número de dias de chuva (NRD). Outro comportamento verificado foi a alta correlação entre o CS-D1, nos dois últimos cortes.

Esses resultados reafirmam a importância da precipitação no processo de lixiviação dos sais do solo, corroborando Zhang et al. (2020). Quanto à alta correlação do CS-D2 com os dois últimos cortes, isso ocorreu devido à intensificação do manejo da irrigação com efluente doméstico tratado. Chaganti et al. (2021) verificaram que solos irrigados com água residuária obtiveram um incremento no teor de carbono orgânico do solo de 10.14% ($3,26 \text{ g kg}^{-1}$) quando comparados com solos irrigados com água doce ($2,96 \text{ g kg}^{-1}$), corroborando Rezapour et al. (2021).

4.5 Análise comparativa do modelo determinístico (RLM) e do algoritmo de aprendizagem de máquina (RF) na estimativa do LAI do sorgo

Ao analisar os valores medidos e estimados de LAI (Figura 8), os dois modelos apresentaram resultados promissores. No entanto, o RF apresentou R^2 superior ao RML com valores de RMSE e MAE bem próximos, indicando que ambos os modelos podem fornecer estimativas precisas de LAI. Wang et al. (2016), ao avaliar o desempenho de três modelos para estimativa da biomassa do trigo, verificaram que o modelo RF apresentou boa precisão na estimativa da biomassa do sorgo nas três fases avaliadas, com valores de R^2 de 0,53; 0,72 e 0,79, respectivamente.

Xie et al. (2021) compararam modelos de regressão linear múltipla (RLM) e Random Forest (RF), para estimar as atividades enzimáticas do solo em terras salinas costeiras recuperadas, os autores verificaram que o modelo RF teve um desempenho muito melhor do que o modelo MLR na estimativa da atividade de amilase e urease do solo, a partir de índices de erro muito mais baixos (MAE e RMSE) e maior valor de R^2 .

5. Conclusões

A irrigação com efluente doméstico tratado elevou a salinidade do solo. Todavia, foi verificado que a ocorrência de chuvas favoreceu a diminuição da salinidade do solo devido sua capacidade de lixiviação dos sais ao longo do perfil do solo.

No atual cenário de mudanças climáticas, no aspecto de sustentabilidade, a melhor lâmina recomendada para irrigação de sorgo consorciado com a palma

forageira em regiões semiáridas é a de 80% da ETc com utilização de cobertura morta.

A utilização de efluente doméstico tratado associado ao uso de cobertura morta, favorece o potencial produtivo em regiões com baixa disponibilidade hídrica.

Foi verificado que o consórcio palma-sorgo otimizou a resposta produtiva por unidade de área.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer às seguintes organizações pelo apoio: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes); Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (420.488/2018-9 e 403.622/2020-4); a Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP; Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco – FACEPE (Bolsa IBPG-1758-5.03/15 e Projeto “Tecnologias Hídricas para o semiárido” – Outorga APQ 0300-5.03/17; 0414-5.03/20); Instituto Agrônomo de Pernambuco – IPA; e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrônômica da Universidade Federal Rural.

Referências bibliográficas

Abd-Elwahed, M.S., 2018. Influence of long-term wastewater irrigation on soil quality and its spatial distribution. *Annals of Agricultural Sciences* 63. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2018.11.004>

Adilakshmi, K., Prasuna Rani, P., Ratna Prasad, P., Lakshmiathy, R., 2018. Biological Properties of Saline Soils Grown with Different Sorghum Cultivars. *Int J*

Curr Microbiol Appl Sci 7, 2096–2105.

<https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.704.240>

Akhtar, K., Wang, W., Ren, G., Khan, Ahmad, Enguang, N., Khan, Aziz, Feng, Y., Yang, G., Wang, H., 2020. Straw mulching with inorganic nitrogen fertilizer reduces soil CO₂ and N₂O emissions and improves wheat yield. *Science of the Total Environment* 741. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140488>

Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., De Moraes Gonçalves, J.L., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

Alves, C.P., de Souza, L.S.B., Jardim, A.M. da R.F., Júnior, G.D.N.A., Pinheiro, A.G., da Silva Salvador, K.R., da Silva, G.Í.N., da Silva, T.G.F., 2021. Agricultural resilience in intercropped forage palma-sorghum cultivation in a semi-arid environment: A review. *Revista Brasileira de Geografia Física* 14. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.7.p3932-3952>

Alves, H.K.M.N., Jardim, A.M. da R.F., Araújo Júnior, G. do N., Souza, C.A.A. de, Leite, R.M.C., Silva, G.I.N. da, Souza, L.S.B. de, Silva, T.G.F. da, 2022. Uma abordagem sobre práticas agrícolas resilientes para maximização sustentável dos sistemas de produção no Semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física* 15. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.1.p373-392>

Araújo Júnior, G. do N., Silva, T.G.F. da, Souza, L.S.B. de, Araújo, G.G.L. de, Moura, M.S.B. de, Alves, C.P., Salvador, K.R. da S., Souza, C.A.A. de, Montenegro, A.A. de A., Silva, M.J. da, 2021. Phenophases, morphophysiological indices and cutting time in clones of the forage cacti under controlled water regimes in a semiarid environment. *J Arid Environ* 190. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104510>

Ashenafi, W., Bethel, N.L.M., Teshome, B., 2019. Evaluation of some selected forage grasses for their salt tolerance, ameliorative effect and biomass yield under salt affected soil at Southern Afar, Ethiopia. *Journal of Soil Science and Environmental Management* 10. <https://doi.org/10.5897/jssem2018.0754>

Barakat, M.A.S., Abd El-Mageed, T.A., Elsayed, I.N., Semida, W.M., 2020. Effect of soil mulching on growth, productivity, and water use efficiency of potato (*Solanum*

tuberosum L.) under deficit irrigation. Archives of Agriculture and Environmental Science 5. <https://doi.org/10.26832/24566632.2020.0503014>

Basile, A., Coppola, A., 2019. Special issue “soil hydrology in agriculture.” Water (Switzerland). <https://doi.org/10.3390/w11071430>

Cantarella, H., Trivelin, P.O., 2011. Determinação de nitrogênio inorgânico em solo pelo método da destilação a vapor, in: Análise Química Para Avaliação Da Fertilidade de Solos Tropicais.

Carvalho, A.A., Montenegro, A.A. de A., Tabosa, J.N., Almeida, T.A.B., Silva, A.G.O. da, Silveira, A.V.M., 2020. Reuso hidroagrícola: uma solução para convivência com a escassez hídrica no Sertão e Agreste pernambucano. Journal of Environmental Analysis and Progress 5. <https://doi.org/10.24221/jeap.5.2.2020.2841.140-150>

Chadalavada, K., Kumari, B.D.R., Kumar, T.S., 2021. Sorghum mitigates climate variability and change on crop yield and quality. Planta. <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03631-2>

Chaganti, V.N., Ganjegunte, G., Somenahally, A., Hargrove, W.L., Ulery, A., Enciso, J.M., Flynn, R., 2021. Response of soil organic carbon and soil health indicators to treated wastewater irrigation in bioenergy sorghum production on an arid soil. Land Degrad Dev 32. <https://doi.org/10.1002/ldr.3888>

Chimonyo, V.G.P., Modi, A.T., Mabhaudhi, T., 2018. Sorghum radiation use efficiency and biomass partitioning in intercrop systems. South African Journal of Botany 118, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.06.009>

Corwin, D.L., Grattan, S.R., 2018. Are Existing Irrigation Salinity Leaching Requirement Guidelines Overly Conservative or Obsolete? Journal of Irrigation and Drainage Engineering 144. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ir.1943-4774.0001319](https://doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0001319)

COSTA, J.P.N., MEDEIROS, J.F., NUNES, R.M.D.A., CAVALCANTE JÚNIOR, E.G., LIRA, J.F.B., 2017. CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DA PRIMEIRA REBROTA DE CULTIVARES DE SORGO SOB DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO. Rev Bras Milho Sorgo 16, 449. <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v16n3p449-459>

Costa, R.L., Macedo de Mello Baptista, G., Gomes, H.B., Daniel dos Santos Silva, F., Lins da Rocha Júnior, R., de Araújo Salvador, M., Herdies, D.L., 2020. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. *Weather Clim Extrem* 28. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100254>

Cucci, G., Lacolla, G., Mastro, M.A., Caranfa, G., 2016. Leaching effect of rainfall on soil under four-year saline water irrigation. *Soil and Water Research* 11. <https://doi.org/10.17221/20/2015-SWR>

da Silva, Thieres George Freire, de Medeiros, R.S., Arraes, F.D.D., Ramos, C.M.C., Araújo Júnior, G. do N., Jardim, A.M. da R.F., Alves, C.P., Campos, F.S., da Silva, M.V., de Moraes, J.E.F., de Souza, C.A.A., Siqueira e Silva, S.M., dos Santos, D.C., de Carvalho, A.A., de Souza, L.S.B., 2023a. Palma–sorghum intercropping combined with management interventions of planting density, row orientation and nitrogen fertilisation can optimise water use in dry regions. *Science of The Total Environment* 895. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165102>

da Silva, Thieres George Freire, de Medeiros, R.S., Arraes, F.D.D., Ramos, C.M.C., Araújo Júnior, G. do N., Jardim, A.M. da R.F., Alves, C.P., Campos, F.S., da Silva, M.V., de Moraes, J.E.F., de Souza, C.A.A., Siqueira e Silva, S.M., dos Santos, D.C., de Carvalho, A.A., de Souza, L.S.B., 2023b. Palma–sorghum intercropping combined with management interventions of planting density, row orientation and nitrogen fertilisation can optimise water use in dry regions. *Science of The Total Environment* 895, 165102. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165102>

da Silva, Thieres G.F., Jardim, A.M. da R.F., Diniz, W.J. da S., de Souza, L.S.B., Araújo Júnior, G.D.N., da Silva, G.Í.N., Alves, C.P., de Souza, C.A.A., de Moraes, J.E.F., 2023. Profitability of using irrigation in forage palma-sorghum intercropping for farmers in semi-arid environment. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 27, 132–139. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n2p132-139>

Dantas, F.D.G., Santos, M.V.F. dos, Lima, G.F. da C., Coêlho, J.J., Medeiros, J.F. de, Cunha, M.V. da, 2023. Drip irrigation with saline water combined with mulch cover as strategies for forage palma production in semi-arid zones. *Irrig Sci* 41. <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00841-8>

Carvalho, A.A., Abelardo, A.A., da Silva, H.P., Lopes, I., de Moraes, J.E.F., da Silva, T.G.F., 2020. Trends of rainfall and temperature in Northeast Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 24. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n1p15-23>

de Carvalho, A.A., Montenegro, A.A. de A., de Lima, J.L.M.P., da Silva, T.G.F., Pedrosa, E.M.R., Almeida, T.A.B., 2021. Coupling water resources and agricultural practices for Sorghum in a semiarid environment. *Water (Switzerland)* 13. <https://doi.org/10.3390/w13162288>

de Lemos, M., Ferreira-Neto, M., Santos Fernandes, C. dos, Bezerra de Lima, Y., Da Silva Dias, N., Medeiros, J.F. de, Fernandes de Brito, R., Silva Sá, F.V. da, 2021. The effect of domestic sewage effluent and planting density on growth and yield of prickly pear palma in the semiarid region of Brazil. *J Arid Environ* 185. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104372>

de Queiroz, M.G., da Silva, T.G.F., Zolnier, S., Jardim, A.M. da R.F., de Souza, C.A.A., Araújo Júnior, G. do N., de Moraes, J.E.F., de Souza, L.S.B., 2020. Spatial and temporal dynamics of soil moisture for surfaces with a change in land use in the semi-arid region of Brazil. *Catena (Amst)* 188. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104457>

de Sá Souza, M., Júnior, G. do N.A., de Souza, L.S.B., Ferraz Jardim, A.M. da R., da Silva, G.I.N., de Araújo, G.G.L., Campos, F.S., Leite, M.L. de M.V., Tabosa, J.N., Silva, T.G.F. da, 2022. Forage yield, competition and economic benefit of intercropping palma and millet with mulch in a semi-arid environment. *Afr J Range Forage Sci*. <https://doi.org/10.2989/10220119.2021.2016967>

Du, C., Li, L., Effah, Z., 2022. Effects of Straw Mulching and Reduced Tillage on Crop Production and Environment: A Review. *Water (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/w14162471>

El-Mageed, T.A.A., Mohammed, S.A., El-Samnoudi, I.M., Ibrahirm, A.E.M., 2018. Interactive Effects of Soil Salinity and Water Table Depth on Soil Properties and Sorghum (*Sorghum Bicolor* L. Moench) Production. *Archives of Agriculture and Environmental Science* 3. <https://doi.org/10.26832/24566632.2018.030102>

Gano, B., Dembele, J.S.B., Tovignan, T.K., Sine, B., Vadez, V., Diouf, D., Audebert, A., 2021. Article adaptation responses to early drought stress of west africa sorghum varieties. *Agronomy* 11. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030443>

Jahansouz, M.R., Afshar, R.K., Heidari, H., Masoud, H., 2014. Evaluation of Yield and Quality of Sorghum and Millet as Alternative Forage Crops to Corn under Normal and Deficit Irrigation Regimes. *Jordan Journal of Agricultural Sciences* 10.

Jardim, A.M. da R.F., da Silva, T.G.F., de Souza, L.S.B., Souza, M. de S., de Moraes, J.E.F., Araújo, G.D.N., 2020. Multivariate analysis in the morpho-yield evaluation of forage palma intercropped with sorghum. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 24. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n11p756-761>

Jardim, A.M. da R.F., Silva, T.G.F. da, Souza, L.S.B. de, Araújo Júnior, G. do N., Alves, H.K.M.N., Souza, M. de S., Araújo, G.G.L. de, Moura, M.S.B. de, 2021. Intercropping forage palma and sorghum in a semi-arid environment improves biological efficiency and competitive ability through interspecific complementarity. *J Arid Environ* 188. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104464>

Justi, A.L., Vilas Boas, M.A., Sampaio, S.C., 2010. Índice de capacidade do processo na avaliação da irrigação por aspersão. *Engenharia Agrícola* 30. <https://doi.org/10.1590/s0100-69162010000200008>

Kaiser, H.F., 1960. The Application of Electronic Computers to Factor Analysis. *Educ Psychol Meas* 20. <https://doi.org/10.1177/001316446002000116>

Kothari, K., Ale, S., Bordovsky, J.P., Munster, C.L., 2020. Assessing the climate change impacts on grain sorghum yield and irrigation water use under full and deficit irrigation strategies. *Trans ASABE* 63. <https://doi.org/10.13031/trans.13465>

Lessa, C.I.N., de Lacerda, C.F., Cajazeiras, C.C. de A., Neves, A.L.R., Lopes, F.B., Silva, A.O. da, Sousa, H.C., Gheyi, H.R., Nogueira, R. da S., Lima, S.C.R.V., Costa, R.N.T., Sousa, G.G. de, 2023. Potential of Brackish Groundwater for Different Biosaline Agriculture Systems in the Brazilian Semi-Arid Region. *Agriculture (Switzerland)* 13. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030550>

Xi, Liang., John, E., Erickson., Wilfred, Vermerris., Diane, L., Rowland., Lynn, E., Sollenberger., Maria, L., Silveira. (2017). Root architecture of sorghum genotypes

differing in root angles under different water regimes. *Journal of Crop Improvement*, 31(1):39-55. doi: 10.1080/15427528.2016.1258603

Libutti, A., Gatta, G., Gagliardi, A., Vergine, P., Pollice, A., Beneduce, L., Disciglio, G., Tarantino, E., 2018. Agro-industrial wastewater reuse for irrigation of a vegetable crop succession under Mediterranean conditions. *Agric Water Manag* 196, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.015>

Lima, L.R., Da Silva, T.G.F., De Caldas Pereira, P., De Moraes, J.E.F., De Sáassis, M.C., 2018. Productive-economic benefit of forage palma-sorghum intercropping systems irrigated with saline water. *Revista Caatinga* 31. <https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n122rc>

Lopes, I., Montenegro, A.A.A., de Lima, J.L.M.P., 2019. Performance of conservation techniques for semiarid environments: Field observations with caatinga, Mulch, and Palma Forage Palma. *Water (Switzerland)* 11. <https://doi.org/10.3390/w11040792>

Ma, J., Wang, X., Zhao, X., Tian, L., Wang, Y., 2022. Experimental study of mulching effects on water restoration of deep, desiccated soil in a loess hilly region. *Environmental Technology (United Kingdom)* 43. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1922941>

Mainardis, M., Cecconet, D., Moretti, A., Callegari, A., Goi, D., Freguia, S., Capodaglio, A.G., 2022. Wastewater fertigation in agriculture: Issues and opportunities for improved water management and circular economy. *Environmental Pollution*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118755>

Mendonça, T.G., Berça, A.S., Souza, C.F., 2019. USO DA ÁGUA EM TOMATEIRO CULTIVADO COM COBERTURA MORTA EM CASA DE VEGETAÇÃO. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* 13. <https://doi.org/10.7127/rbai.v13n1001008>

Meneguzzo, F., Zabini, F., 2021. Water Conservation and Resource Efficiency in Agriculture. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66284-4_6

Montenegro, A.A.A., Abrantes, J.R.C.B., De Lima, J.L.M.P., Singh, V.P., Santos, T.E.M., 2013. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. *Catena (Amst)* 109. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.03.018>

Montenegro, A.A.A., Almeida, T.A.B., de Lima, C.A., Abrantes, J.R.C.B., de Lima, J.L.M.P., 2020. Evaluating mulch cover with coir dust and cover crop with Palma palma as soil and water conservation techniques for semiarid environments: Laboratory soil flume study under simulated rainfall. *Hydrology* 7. <https://doi.org/10.3390/HYDROLOGY7030061>

Muralikrishnan, L., Padaria, R.N., Choudhary, A.K., Dass, A., Shokralla, S., Zin El-Abedin, T.K., Abdelmohsen, S.A.M., Mahmoud, E.A., Elansary, H.O., 2022. Climate change-induced drought impacts, adaptation and mitigation measures in semi-arid pastoral and agricultural watersheds. *Sustainability (Switzerland)* 14. <https://doi.org/10.3390/su14010006>

Naser, I.H.R.A.C.K.A.A., n.d. Effect of Frost and Salts Dissolved after Heavy Rain on the Productivity of Olive Trees under Desert Growing Conditions.

Nyagatare, G., Shingiro, C., Nyiranziringirimana, C., 2021. Effect of domestic grey water reuse for irrigation on soil physical and chemical characteristics and tomatoes growth. *Journal of Agriculture and Environment for International Development* 115, 31–47. <https://doi.org/10.36253/JAEID-12069>

Patil, P.D., Bhange, V.P., Shende, S.S., Ghorpade, P.S., 2022. Greywater characterization of an Indian household and potential treatment for reuse. *Water-Energy Nexus* 5. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2021.12.001>

Pereira, M.L.T., Soares, M.P.A., Silva, E.A., Montenegro, A.A.D.A., Souza, W.M. de, 2017. Variabilidade climática no Agreste de Pernambuco e os desastres decorrentes dos extremos climáticos. *Journal of Environmental Analysis and Progress* 2. <https://doi.org/10.24221/jeap.2.4.2017.1452.394-402>

Pinheiro, K.M., da Silva, T.G.F., de Sousa Carvalho, H.F., Santos, J.E.O., de Moraes, J.E.F., Zolnier, S., dos Santos, D.C., 2014. Correlações do índice de área do cladódio com características morfogênicas e produtivas da palma forrageira. *Pesqui Agropecu Bras* 49. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014001200004>

Raeisi, L.G., Morid, S., Delavar, M., Srinivasan, R., 2019. Effect and side-effect assessment of different agricultural water saving measures in an integrated framework. *Agric Water Manag* 223. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105685>

Rezapour, S., Nouri, A., Jalil, H.M., Hawkins, S.A., Lukas, S.B., 2021. Influence of treated wastewater irrigation on soil nutritional-chemical attributes using soil quality index. *Sustainability (Switzerland)* 13. <https://doi.org/10.3390/su13041952>

Rudorff, C., Sparrow, S., Guedes, M.R.G., Tett, Simon.F.B., Brêda, J.P.L.F., Cunningham, C., Ribeiro, F.N.D., Palharini, R.S.A., Lott, F.C., 2022. Event attribution of Parnaíba River floods in Northeastern Brazil. *Climate Resilience and Sustainability* 1. <https://doi.org/10.1002/cli2.16>

Santacruz-De León, G., Moran-Ramírez, J., Ramos-Leal, J.A., 2022. Impact of Drought and Groundwater Quality on Agriculture in a Semi-Arid Zone of Mexico. *Agriculture (Switzerland)* 12. <https://doi.org/10.3390/agriculture12091379>

Santos, S.M. dos, de Farias, M.M.M.W.E.C., 2017. Potential for rainwater harvesting in a dry climate: Assessments in a semiarid region in northeast Brazil. *J Clean Prod* 164. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.251>

Santos, K.S., Montenegro, A.A.A., Almeida, B.G. de, Montenegro, S.M.G.L., Andrade, T. da S., Fontes Júnior, R.V. de P., 2012. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 16. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662012000800003>

Sena, C.C.R., Ferreira, A.A., Evangelista, Z.R., Araujo, K.K.S., 2020. SOIL MULCHING AND DEFICIT IRRIGATION WITH WASTEWATER IN THE QUALITY OF ITALIAN ZUCCHINI. *REVISTA DE AGRICULTURA NEOTROPICAL* 7. <https://doi.org/10.32404/rean.v7i3.4411>

Shahrokhnia, H., Wu, L., 2021. SALEACH: A new web-based soil salinity leaching model for improved irrigation management. *Agric Water Manag* 252. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106905>

Shih, S.F., Gascho, G.J., Rahi, G.S., 1981. Modeling Biomass Production of Sweet Sorghum 1. *Agron J* 73. <https://doi.org/10.2134/agronj1981.00021962007300060028x>

Silva, T.G.F. da, Araújo Primo, J.T., Morais, J.E.F. de, Diniz, W.J. da S., Souza, C.A.A. de, Silva, M. da C., 2015. Crescimento e produtividade de clones de palma

forrageira no semiárido e relações com variáveis meteorológicas. *Revista Caatinga* 28.

Silva, J.S., Utsumi, A.G., Diniz dos Santos, C.E., 2023. Potencial de Utilização de Água de Reúso em Polo Nacional De Agricultura Irrigada. *Revista Brasileira de Geografia Física* 16. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.3.p1175-1185>

Soni, P.G., Basak, N., Rai, A.K., Sundha, P., Narjary, B., Kumar, P., Yadav, G., Kumar, S., Yadav, R.K., 2021. Deficit saline water irrigation under reduced tillage and residue mulch improves soil health in sorghum-wheat cropping system in semi-arid region. *Sci Rep* 11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80364-4>

Souza, M.D.S., Freire da Silva, T.G., de Souza, L.S.B., Alves, H.K.M.N., Leite, R.M.C., de Souza, C.A.A., Araújo, G.G.L.D., Campos, F.S., Silva, M.J.D., de Souza, P.J.D.O.P., 2022. Growth, phenology and harvesting time of palma-millet intercropping system under biotic mulching. *Arch Agron Soil Sci* 68. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1852553>

Veetil, A.V., Mishra, A.K., Green, T.R., 2022. Explaining water security indicators using hydrologic and agricultural systems models. *J Hydrol (Amst)* 607. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127463>

Wang, L., Zhou, X., Zhu, X., Dong, Z., Guo, W., 2016. Estimation of biomass in wheat using random forest regression algorithm and remote sensing data. *Crop Journal* 4. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2016.01.008>

Xie, X., Wu, T., Zhu, M., Jiang, G., Xu, Y., Wang, X., Pu, L., 2021. Comparison of random forest and multiple linear regression models for estimation of soil extracellular enzyme activities in agricultural reclaimed coastal saline land. *Ecol Indic* 120. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106925>

Yang, T., Šimůnek, J., Mo, M., Mccullough-Sanden, B., Shahrokhnia, H., Cherchian, S., Wu, L., 2019. Assessing salinity leaching efficiency in three soils by the HYDRUS-1D and -2D simulations. *Soil Tillage Res* 194. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104342>



Yeomans, J.C., Bremner, J.M., 1988. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Commun Soil Sci Plant Anal* 19. <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>

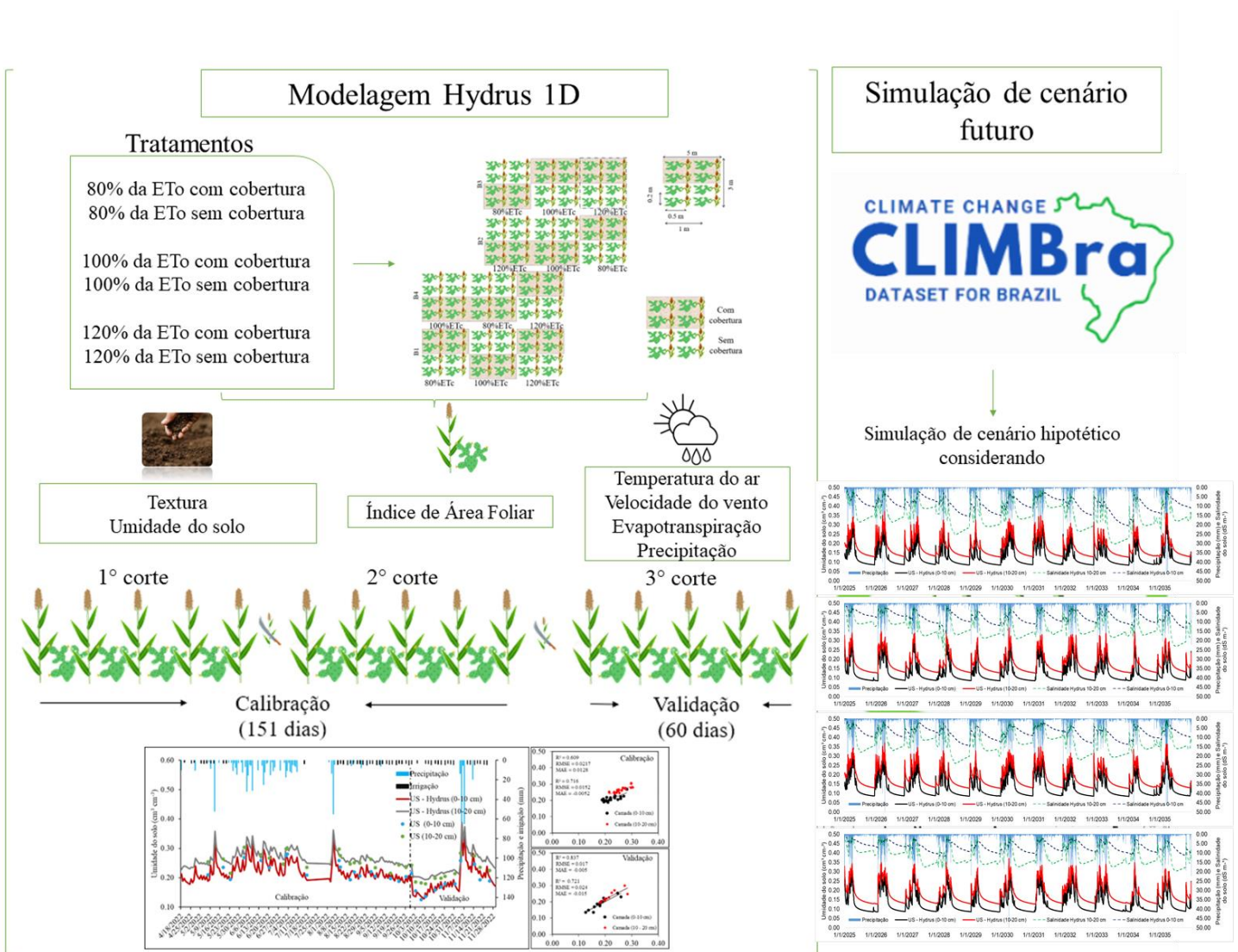
Zhang, Y., Zhu, Y., Yao, B., 2020. A study on interannual change features of soil salinity of cotton field with drip irrigation under mulch in Southern Xinjiang. *PLoS One* 15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0244404>

CAPÍTULO 3

Performance do HYDRUS-1D na simulação da umidade e sais do solo cultivado com palma e sorgo irrigado com esgoto tratado em cenários de mudanças climáticas no Semiárido brasileiro

CAPÍTULO 3 – Performance do HYDRUS-1D na simulação da umidade e sais do solo cultivado com palma e sorgo irrigado com esgoto tratado em cenários de mudanças climáticas no Semiárido brasileiro

GRAPHICAL ABSTRACT



Resumo

A gestão eficiente da água no solo é fundamental para a agricultura sustentável, especialmente em face das mudanças climáticas. Neste contexto, o uso de ferramentas avançadas de modelagem hidrológica, associado a um conjunto com práticas agrícolas como a cobertura morta, cultivos consorciados e utilização de esgoto tratado na irrigação, emergem como estratégias promissoras para otimizar a produção agrícola. A vista disso, o objetivo dessa pesquisa foi realizar a modelagem da dinâmica de umidade e salinidade do solo em um cultivo consorciado de sorgo-palma irrigado com efluente doméstico tratado, considerando a presença e ausência de cobertura morta, no semiárido brasileiro. O experimento foi realizado na estação de tratamento de esgoto localizado no do Distrito de Mutuca, Pesqueira-PE. Foi cultivado a variedade de palma forrageira, Orelha de Elefante Mexicana (*Opuntia stricta* (Haw) Haw.) consorciado com o sorgo cv. IPA SUDAN 4202 (*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf). Os plantios das culturas aconteceram nos dias 18/04/2021 e 18/04/2022, respectivamente. Foram considerados 3 cortes do sorgo. Sendo 2 cortes correspondentes à calibração (151 dias) e um corte para validação (60 dias). O monitoramento da umidade foi realizado por meio do método gravimétrico e a salinidade foi obtida por meio de pastas de saturação. O modelo mostrou-se eficiente através do erro quadrático médio (RMSE) e erro médio absoluto (MAE). Com base nas simulações numéricas em relação à estimativa da umidade do solo com o modelo HYDRUS-1D, resultou em dados coerentes em comparação com os medidos em campo, apresentando elevada precisão, principalmente durante o período chuvoso. Foi verificada uma tendência de superestimação dos valores de condutividade elétrica do solo pelo modelo HYDRUS – 1D, no entanto, verificou-se também que os valores medidos acompanharam a dinâmica dos valores observados. Além disso, no período chuvoso, verifica-se que a CE apresentou os menores valores, e isso está associado à lixiviação dos sais e lavagem do solo. O aumento de 1,5 °C na temperatura média global acarretará a diminuição da umidade do solo em aproximadamente 56%, na camada mais superficial, todavia, a cobertura morta atua como prática mitigadora dessa diminuição em 30.7%. A estimativa da salinidade do solo na condição sem cobertura morta foi superior em aproximadamente 45,63 e 37.84% quando comparada a salinidade na condição com cobertura morta, em ambas as camadas analisadas. Os resultados obtidos do modelo HYDRUS-1D têm implicações práticas para a agricultura e a gestão de recursos hídricos, destacando a necessidade de adaptação às mudanças climáticas para garantir a segurança hídrica e a sustentabilidade agrícola.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica; HYDRUS-1D consórcio; cobertura morta; irrigação.

1. Introdução

No Semiárido brasileiro existe uma necessidade eminente do uso alternativo de água residuária tratada para cultivos agrícolas, em função dos recursos hídricos escassos e aumento dos períodos de estiagens e da redução de chuva (Carvalho et al., 2020; Jardim et al., 2020; Hejazi et al., 2023), fortemente intensificados pelas mudanças climáticas globais que impactam os padrões de precipitação e temperatura (Kumr e Kumar, 2023) e em escala regional, no Nordeste brasileiro (Carvalho et al., 2019), causando alteração do ciclo hidrológico, como, aumento na demanda agrícola, com destaque para as projeções de aumento da temperatura (IPCC, 2021).

O reúso hidroagrícola, embora seja uma prática essencial para enfrentar desafios relacionados à escassez de água, pode desencadear preocupações significativas em relação à salinização dos solos (Muhammad et al., 2022). Uma vez que a água residuária frequentemente contém concentrações variadas de sais, e a introdução desses sais no solo quando ocorre de maneira contínua, provoca um acúmulo prejudicial à produção agrícola (Harper et al., 2020). Dessa forma, é imperativo implementar estratégias de monitoramento rigorosas e práticas de manejo adequadas para mitigar os impactos da salinização do solo no contexto do reúso hidroagrícola, garantindo a sustentabilidade a longo prazo da agricultura irrigada com água reaproveitada (Mishra et al., 2023).

Outro destaque é que as alterações climáticas, impactam significativamente a produção de forragem no Semiárido brasileiro, comprometendo fortemente a agropecuária. Como alternativas, o uso de espécies adaptadas, altamente tolerantes a escassez hídrica, são recomendadas, como a palma forrageira e sorgo forrageiro (Silveira et al., 2023; Aboagla et al., 2023), e nos últimos anos, para otimizar o uso da terra, uma estratégia recomendada por Silva et al. (2022) é o cultivo consorciado como uma estratégia agrícola para e aumentar a eficiência no uso da água.

Outro ponto fundamental do consórcio entre palma e sorgo, está relacionado aos benefícios evidenciados em relação à complementação alimentar, uma vez que a palma é uma cultura rica em energia, mas apresenta baixo teor de fibra, sendo este compensado pela presença da cultura do sorgo (Diniz et al., 2017; Cardoso et al., 2019; Araújo Júnior et al., 2021; Salvador et al., 2021), além de otimizar as áreas cultivadas, promovendo a ação microbiológica do solo e diversificam a oferta de forragem. Estudos de Jardim et al. (2021) indicam que o consórcio palma-sorgo supera em 47% e 3,5 vezes, em termos de matéria fresca e seca, o sistema de palma única, sem afetar a qualidade da forragem. Silva et al. (2023) afirmam que o sistema palma forrageira-sorgo proporcionou excelentes respostas em termos de produtividades de matéria fresca, representando uma excelente alternativa para sistemas de irrigação. Esses aspectos contribuem para dietas mais completas, reduzindo problemas metabólicos e equilibrando as necessidades nutricionais dos ruminantes (Araújo Júnior et al., 2021).

Outro ponto que deve ser considerado é que a irrigação da palma forrageira é uma prática torna o custo de produção elevado, já que a cultura é altamente

tolerante a escassez hídrica, no entanto, em situações de consórcio, em que se irriga a outra cultura, em situações de proximidade da linha de plantio da palma, se torna viável (Silva et al., 2023). Além disso, ambas as no arranjo sorgo-palma, as plantas possuem características morfológicas que permitem maximizam suas capacidades de extração e utilização da água disponível de maneira eficaz (Frota et al., 2015; Salvador et al., 2021). A quantidade adequada de umidade no solo é essencial para o crescimento saudável das plantas, influenciando diretamente na absorção de nutrientes e no desenvolvimento das raízes (Fernandéz, 2023). O monitoramento da umidade do solo auxilia na tomada de relativo à aplicação da irrigação, evitando tanto o excesso, quanto a escassez de água, o que contribui para a economia de recursos hídricos e aumenta a eficiência na produção (Iriyanta et al., 2023).

No contexto hidroagrícola, a incorporação da cobertura morta nos cultivos desempenha um papel significativo na otimização da retenção hídrica no solo. Essa prática também contribui para a redução do impacto das precipitações pluviais, mitiga processos erosivos e restringe a proliferação de plantas invasoras. Além disso, a cobertura morta minimiza as taxas de evaporação da água presente no solo, reduzindo conseqüentemente os riscos de salinização (Mendonça et al., 2019; Montenegro et al., 2020; Sena et al., 2020). A adoção de técnicas de cultivo baseadas em mulching proporciona benefícios como plantas mais vigorosas e produtivas, ao mesmo tempo, em que promove a sustentabilidade das operações agrícolas (Carvalho et al., 2021). Amorim et al. (2017) observaram que sistemas de cultivo exclusivo com cobertura morta e consórcio palma-sorgo resultaram em um aumento expressivo na taxa de acúmulo mensal de matéria seca de forragem, com

uma antecipação significativa no momento de corte para o sistema consórcio palma-sorgo.

Considerando os custos associados e o cenário de mudanças climáticas, o reúso hidroagrícola, embora seja uma prática essencial para enfrentar desafios relacionados à escassez de água, pode desencadear preocupações significativas em relação à salinização dos solos (Muhammad et al., 2022). Uma vez que a água residuária, frequentemente contém concentrações variadas de sais, e a introdução desses sais no solo quando ocorre de maneira contínua provoca um acúmulo prejudicial à produção agrícola (Harper et al., 2020). Dessa forma, é imperativo implementar estratégias de monitoramento rigorosas e práticas de manejo adequadas para mitigar os impactos da salinização do solo no contexto do reúso hidroagrícola, garantindo a sustentabilidade a longo prazo da agricultura irrigada com água reaproveitada (Mishra et al., 2023).

Paralelo a isso, os avanços na modelagem hidrológica em cultivos agrícolas, associados ao uso de cobertura morta, e a utilização de esgoto tratado na irrigação, emergem como estratégias promissoras para a conservação da umidade do solo (Chen et al., 2022; Fikadu et al., 2022). Essas abordagens possibilitam a compreensão dos impactos de possíveis cenários ambientais na agricultura, como os efeitos das mudanças climáticas, bem como a simulação das melhores estratégias de resiliência relacionadas à sustentabilidade agrícola (Costa et al., 2021). Dentre os modelos hidrológicos que contribuem para o entendimento dos processos hidrológicos com o uso de água residuária e cobertura morta, destaca-se o HYDRUS (Andrade et al., 2018; Nektarios et al., 2023; Avci e Yurtseven, 2022). Assim, o objetivo do estudo foi avaliar o desempenho do modelo HYDRUS na

simulação da umidade e salinidade do solo em um cultivo consorciado de sorgo-palma irrigado com efluente doméstico tratado, considerando a presença e ausência de cobertura morta, em cenários atuais e de mudanças climáticas no Semiárido brasileiro.

2. Material e métodos

2.1 Caracterização da área de estudo

O experimento foi conduzido em uma unidade experimental localizada no Município de Pesqueira, Pernambuco, Brasil (Figura 1). A região é pertencente a Bacia do Ipojuca e possui o clima classificado como AW (Clima Tropical de Savana) e BSh (Clima Semiárido Quente) segundo a classificação de Köppen (Alvares et al., 2013), com temperatura média de 27 °C, precipitação média anual de 670 mm e evapotranspiração média histórica de 1800 mm ano⁻¹.

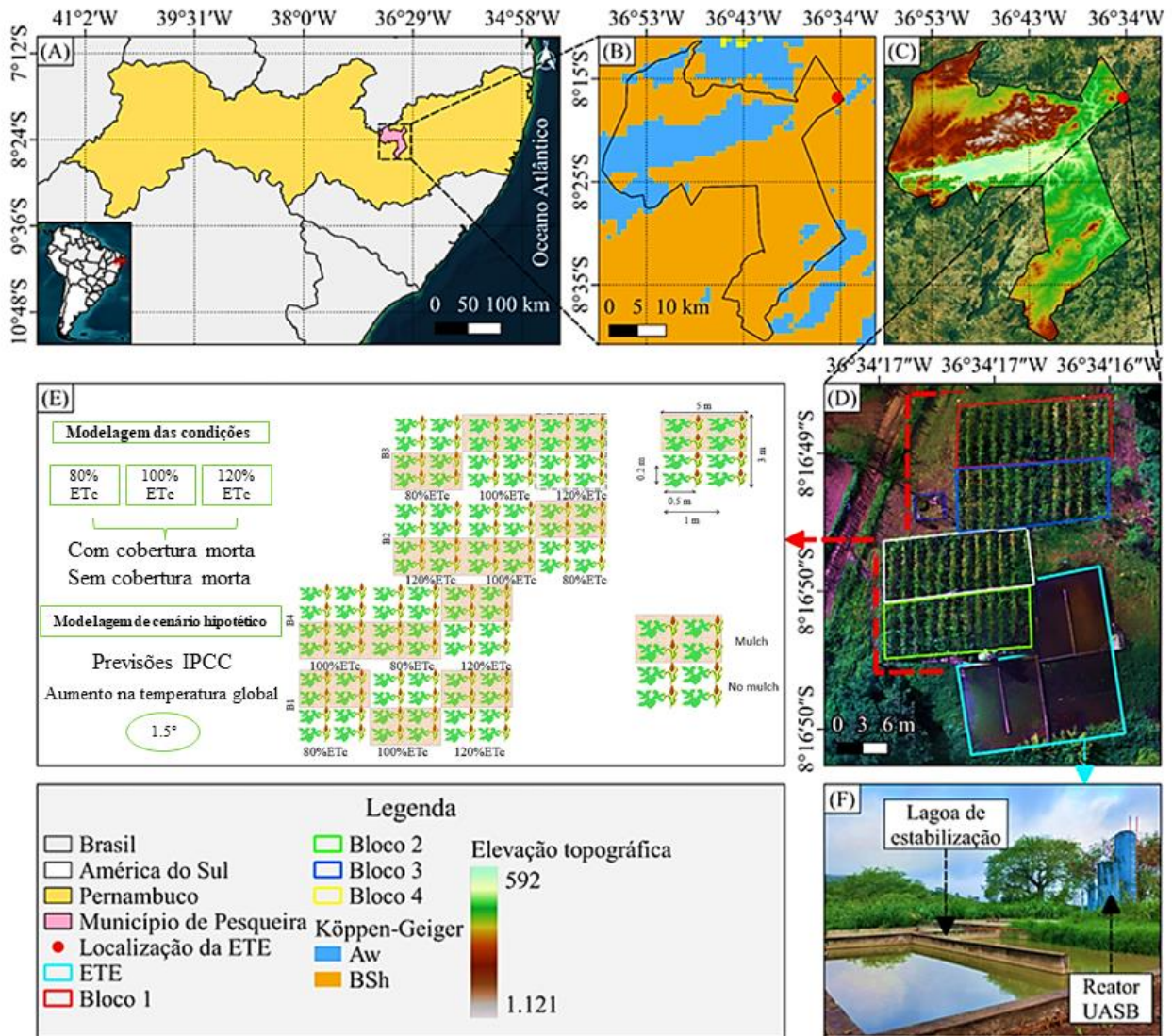


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo

A região tem a predominância das seguintes classes de solos: Planossolos, Neossolos Regolíticos, Argissolos Amarelo e Vermelho-Amarelo e Neossolos Líticos, além de significativas áreas de Afloramentos de Rocha (Santos et al., 2012). A Tabela 1 apresenta os parâmetros físico-químicos do solo.

Tabela 1. Parâmetros físico-químicos do solo

Parâmetros/Camadas	0-10 cm	10-20 cm	20-40 cm
Areia (%)	73.43	72.41	70.43
Silte (%)	11.86	10.72	11.80
Argila (%)	14.71	16.87	17.77
Argila dispersa em água (g/kg)	5.33	6.79	7.09
Grau de flocculação (%)	96.35	96.13	95.88
Densidade de partícula (g/cm ³)	2.60	2.61	2.60
Densidade do solo (g/cm ³)	1.30	1.52	1.68
pH em água	7.42	7.89	8.11
Condutividade elétrica do solo (dS/m)	0.77	1.72	2.44
N(g/kg)	4.64	3.16	2.21
P (mg/dm ³)	117.74	94.23	51.54
K (cmolc/dm ³)	1.54	1.40	1.32
Na (cmolc/dm ³)	1.80	1.98	2.02
Carbono orgânico (g/kg)	14.89	11.35	7.25

Na área experimental foi cultivado o sorgo cv. IPA SUDAN 4202 (*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf) consorciado com a variedade de palma forrageira, Orelha de Elefante Mexicana (*Opuntia stricta* (Haw) Haw.). As plantas de palma foram distribuídas a cada 0,2 m entre si e 1,0 m entre fileiras de plantio e as plantas de sorgo foram distribuídas entre as fileiras da palma, adotando-se um stand final de 12 plantas por metro linear. O período de avaliação durou 210 dias, considerando três ciclos do sorgo, sendo: ciclo 1 (90 dias); ciclo 2 e 3 (60 dias cada um).

2.2 Caracterização do efluente doméstico tratado e usado na irrigação

O efluente utilizado na irrigação do experimento foi obtido da estação de tratamento de esgoto, que recebe águas residuárias de 150 residências, gerando uma vazão aproximada de 3000 L dia⁻¹. As águas residuais passam por um tratamento preliminar que ocorre em uma caixa com grade, a fim de separar os materiais grosseiros. Posteriormente, o efluente passa por uma caixa de areia e são conduzidos aos reatores UASB, tratados e encaminhados para lagoas de estabilização, de onde o efluente polido é bombeado para irrigação. Foi realizado uma análise físico-química dos seguintes pontos: esgoto bruto, lagoa de estabilização e após o sistema de filtragem (Tabela 2).

Tabela 2. Parâmetros físico-químico do efluente utilizado no cultivo.

Parâmetros	Esgoto bruto	Lagoa de estabilização	Após os filtros	Eficiência
DBO (mg/L)	900	125	30.48	96.61
Coliformes totais (NMP/100 mL)	280000	280000	1700	99.39
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 mL)	3900	2000	1.8	99.95
Condutividade elétrica do solo (dS/m)	6.3	5.1	4.2	33.34

2.3 Manejo da irrigação

O sistema de irrigação utilizado foi o gotejamento com orifícios de 1,6 mm, com espaçamento de 0,2 m e vazão de 2,1 m³ h⁻¹. Para garantir a eficiência do sistema, foi realizado o teste de eficiência da aplicação conforme Coeficiente de Uniformidade de Chistiansen (CUC) (Justi et al., 2010), onde se obteve uma uniformidade de 97%.

O manejo da irrigação foi realizado com base na evaporação diária do Tanque Classe A. Para se obter a evapotranspiração da cultura de interesse, que neste caso foi o sorgo, utilizou-se a equação 1.

$$ET_c = ET_o * K_c \quad (1)$$

em que ET_c – Evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1}); ET_o – Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); K_c – Coeficiente de cultivo (Adimensional).

Foi considerado o coeficiente de cultivo (K_c) do sorgo, conforme as fases fenológicas da cultura, sendo estas, fase I (Semeadura e estabelecimento – 0.4); fase II (crescimento vegetativo – 1.1); fase III (floração e formação da produção – 1.00); e fase IV (maturação – 0.7) (Costa et al., 2017).

A evapotranspiração de referência (ET_o), dada pelo produto do coeficiente do tanque (K_p) e a evaporação do tanque classe A (E_{ca}) foi determinada a partir de medidas de evaporação do Tanque Classe “A” (EV) e por meio do coeficiente do tanque (K_p), conforme a metodologia proposta por Pereira et al. (1995) (Equação 2).

$$K_p = \frac{0.85(s+\gamma)}{(s+\gamma)(1+0.34V)} \quad (2)$$

em que V é a velocidade do vento a 2 m de altura (m/s), γ o coeficiente psicrométrico igual a $0,0725 \text{ kPa}/^\circ\text{C}$, para uma pressão atmosférica média de $90,66 \text{ kPa}$ e constante psicrométrica de $80.10^{-5}/^\circ\text{C}$ s é a declividade da curva de pressão de vapor ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$) calculada pela expressão (Equação 3).

$$s = \frac{4098 e_s}{(T+237.3)^2} \quad (3)$$

em que T é a temperatura média do ar (°C), e_s a pressão de saturação (kPa) calculada pela Equação 4.

$$e_s = 0.6108 * 10^{\left(\frac{7.5T}{T+237.3}\right)} \quad (4)$$

A quantidade de água aplicada foi determinada considerando a quantidade de água evaporada durante o período previsto entre duas irrigações, turno de rega de dois dias, conforme adotado por (Carvalho et al., 2020).

2.4 Delineamento experimental e tratamentos

Foi utilizado o delineamento experimental em blocos casualizados (DBC), com quatro repetições e empregado o esquema de parcelas subdivididas (3 x 2 m), as parcelas sendo os três níveis de irrigação (80, 100, 120% da evapotranspiração da cultura, ETc), e a cobertura morta (solo coberto e solo descoberto) sendo as subparcelas. Foi utilizada uma parcela com dimensão de 15 m² (5 x 3 m) e a subparcela foi de 7,5 m² (2,5 x 3,0 m), com área útil de 3 m², onde foram consideradas as fileiras centrais.

A cobertura morta utilizada era composta por material vegetal presente na área experimental, e foram identificadas as seguintes espécies: capim corrente (*Urochloa mosambicensis*), pé de galinha (*Eleusine indica*) capim carrapicho

(*Cenchrus echinatus*) e chichá (*Sterculia striata*). A densidade de cobertura morta adotada foi de 8 t ha⁻¹ conforme recomendações de Montenegro et al. (2013).

2.5 Monitoramento da umidade e condutividade elétrica do solo

O monitoramento da umidade do solo foi realizado por meio do método gravimétrico. A condutividade elétrica do solo (CE), determinada conforme o método usual de saturação-extrato (EMBRAPA, 1999). Ambos os monitoramentos foram realizados por meio de coleta de solo e posteriormente análise em laboratório, considerando dez coletas em cada corte do sorgo.

2.6 Modelo Hydrus 1D

Formulação matemática

O modelo Hydrus-1D soluciona uma versão modificada da equação de Richards.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S \quad (3)$$

em que h é a carga hidráulica (L), θ é o conteúdo volumétrico de água no solo (L³ L⁻³), t é o tempo (T), K é a condutividade hidráulica (L T⁻¹), x é a coordenada espacial (L), α é o ângulo de direção do fluxo e S é o termo de extração de água (L³ L⁻³ T⁻¹) (Silva et al., 2015).

A determinação da relação entre condutividade hidráulica não saturada, o teor de umidade volumétrica e o potencial mátrico do solo, foi realizado utilizando o modelo proposto por van Genuchten- Mualem (Van Genuchten, 1980).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|h|)^n]^m} \quad (4)$$

em que θ_r é a umidade residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), θ_s a umidade na saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), e, n e m são os parâmetros de ajuste do modelo.

O parâmetro empírico de ajuste da curva m é obtido pela relação $m = 1 - (1/n)$, conforme Mualem (1976). A função de condutividade hidráulica é escrita como:

$$K = K_s S_e^1 \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (5)$$

em que x é o parâmetro de inclinação (Mualem, 1976), sendo adotado o valor de 0,5, para a maioria dos solos, e K_s é a condutividade hidráulica do solo saturado (Silva et al., 2015) e S_e é a saturação relativa e m é o parâmetro empírico da curva (Shekhar et al., 2019).

A extração de água pela raiz da planta utiliza o método proposto por Feddes (1978), segundo Macêdo (2018), caracterizado pelo processo de extração de água em escala macroscópica, onde é baseado na hipótese de que a extração de água no solo diminui à medida que ocorre redução do conteúdo de água no solo. Esse método foi modificado por van Genuchten (1987), para que o estresse osmótico fosse incluído.

$$S(h, h\varphi) = \alpha(h, h\varphi)S_{m\acute{a}x} \quad (6)$$

em que, $\alpha(h, h\varphi)$ é a função de resposta da extração pela cultura ao potencial mátrico e osmótico e $S_{m\acute{a}x}$ é a taxa máxima de extração de água ($L^3 L^{-3} T^{-1}$).

Transporte de solutos

O transporte de solutos no modelo Hydrus é resolvido pela equação da advecção - dispersão na fase líquida e pela difusão na fase gasosa, entretanto em solos irrigados a massa total pode ser descrita pela soma do fluxo por advecção e do fluxo por dispersão, não considerando o efeito da difusão. A equação da advecção-dispersão é expressa:

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D h \frac{\partial C}{\partial z} - q_z C \right) \quad (7)$$

em que C é a concentração do soluto na fase líquida do solo ($M L^{-3}$); z é a coordenada vertical (L); Dh é o coeficiente de dispersão hidrodinâmica ($L^2 T^{-1}$), e q_z é o fluxo de massa ($M L^{-2} T^{-1}$).

Para a simulação do transporte de soluto, utilizou-se o período de abril de 2022 a novembro de 2022, onde se analisou as camadas de 0-10 e 10-20 cm do solo. O modelo considerado foi do equilíbrio, em que existe apenas uma região de fluxo móvel, desconsiderando o fluxo preferencial. O coeficiente de dispersividade utilizado foi de $\lambda = 3$ cm, conforme adotado por Monteiro et al. (2009). Como condição de contorno para o transporte de soluto, utilizou-se a condição de limite

do fluxo de concentração, como condição superior, e gradiente zero de concentração, como condição inferior. Como coeficiente de difusão, utilizou-se 1 cm²/dia, o qual é o valor aproximado para a maioria dos solutos (Rassam et al., 2018), e como limiar de absorção de sais sem afetar a produtividade da cultura, utilizou-se 3,0 dS/m, visto que o sorgo tolera até 10 dS/m (IPA, 2007). Como concentração dependente do tempo no limite da superfície do solo, adotou-se 3 dS/m, representando a condutividade elétrica da água residuária tratada utilizada para irrigar as culturas.

Parâmetros de entrada e calibração do modelo

Utilizou-se como parâmetro de entrada do modelo, a granulometria do solo, para estimativa dos parâmetros da equação de Van Genuchten (Tabela 4). Em relação a discretização espacial do perfil do solo, considerou-se as camadas de 0-10 cm e 10-20 cm de solo.

Tabela 4. Resultado na análise textural do solo e parâmetros ajustados da equação de Van Genuchten

Tratamento	Camada	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Ds	Qr	Qs	α	n
80SC	0-10 cm	78	12	10	1,35	0,0505	0,434	0,0335	16,242
	10-20 cm					0,0551	0,4215	0,0265	14,776
80CC	0-10 cm	70	18	12	1,3	0,0486	0,4449	0,035	16,002
	10-20 cm					0,0499	0,4277	0,0285	14,885
100SC	0-10 cm	84	8	8	1,35	0,0515	0,4365	0,0353	18,727
	10-20 cm					0,0505	0,4214	0,0343	17,562
100CC	0-10 cm	78	13	9	1,3	0,0486	0,4449	0,035	16,002
	10-20 cm					0,0542	0,4332	0,0271	14,857
120SC	0-10 cm	68	18	14	1,3	0,054	0,4431	0,0255	14,659
	10-20 cm					0,0574	0,4273	0,0197	14,495
120CC	0-10 cm	75	14	11	1,3	0,0509	0,4457	0,0317	1,537
	10-20 cm					0,0542	0,4332	0,0271	14,857

Como condição de contorno superior, utilizou-se os eventos diários de chuva, irrigação, evaporação e transpiração, para condição de contorno inferior considerou-se conteúdo de água constante, e para inicialização do modelo, foi adotada a primeira leitura umidade, medida por meio do método gravimétrico.

Para a condição de cobertura morta, utilizou-se a taxa de redução da evaporação do solo que a cobertura promove. Utilizou-se uma redução de 20%, conforme a densidade de cobertura morta adotada, como destacado por Freitas et al. (2004) e Aires et al. (2022).

Para extração da água pela planta foram utilizados os parâmetros de Feddes (Tabela 5). Onde $h\phi$ é o potencial mátrico em que as raízes começam a extrair água do solo, $Smáx$ o potencial em que as raízes extraem água na taxa máxima possível, $h2$ potencial mátrico limite em que as raízes já não conseguem extrair água na taxa máxima possível assumindo uma taxa de transpiração potencial igual a $T1$, $h3$ potencial mátrico limite em que as raízes já não conseguem extrair água na taxa máxima possível, entretanto assumindo uma taxa de transpiração potencial igual a $T2$, $h4$ potencial no qual cessa a absorção de água pela raiz, $T1$ taxa de transpiração potencial (atualmente definida em $0,5 \text{ cm dia}^{-1}$), e $T2$ taxa de transpiração potencial (atualmente definida em $0,1 \text{ cm dia}^{-1}$).

Tabela 5. Parâmetros da equação de Feddes

$h\phi$ (cm)	$Smáx$ (cm)	$h2$ (cm)	$h3$ (cm)	$h4$ (cm)	$T1$ (cm dia⁻¹)	$T2$ (cm dia⁻¹)
-15	-30	-325	-600	-8000	0,5	0,1

2.7 Avaliação do modelo

Para avaliação da eficiência dos dados simulados, foram utilizados o erro quadrático médio (RMSE), erro médio absoluto (MAE) e coeficiente de determinação (R^2) da reta, variando de 0 a 1. Os erros RMSE e MAE devem apresentar valores próximos a zero, para indicar precisão do modelo, e o R^2 deve ser superior a 70%.

$$RMSE = \left\{ \frac{1}{n} [\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2] \right\}^{1/2} \quad (7)$$

$$MAE = \left\{ \frac{1}{n} [\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|] \right\} \quad (8)$$

em que X_i é o valor medido, Y_i é o valor estimado e n é o número de observações.

2.8 Modelagem Hydrus 1D considerando cenário de mudanças climáticas

Foi utilizado o conjunto de dados CLIMBra, que compreende 19 projeções de modelos climáticos do CMIP6 para o território brasileiro, com base nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. O CLIMBra fornece séries diárias de precipitação, temperatura máxima e mínima, evapotranspiração de referência, etc. Todas as séries passaram pelo processo de correção de viés utilizando o método de Mapeamento Delta de Quantil e abrangem tanto simulações históricas (1980-2013) quanto futuras (2015-2100) em uma resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Os dados foram extraídos do modelo MIROC6 para os cenários socioeconômicos compartilhados SSP245 (intermediário) e SSP585 (extremo) para o período de

(2025- 2035), além de testar a influência da cobertura morta (redução da evaporação do solo em 20%).

3. Resultados

3.1 Comportamento das variáveis climáticas

Na Figura 2, é possível visualizar a variação ao longo do tempo dos índices de precipitação e evapotranspiração (ET_o) durante o experimento, que compreende os meses de abril a novembro de 2022. Verificou-se uma maior concentração de chuvas nos meses de junho (211,80 mm) e novembro (211,60 mm), com um total acumulado de precipitação atingindo 742,80 mm e precipitação máxima de 104 mm registrado em 11 de novembro de 2022. A quantidade acumulada de evapotranspiração de referência atingiu 735,72 mm, distribuída entre 310,52 mm de evaporação e 253,45 mm de transpiração ao longo dos três cortes do sorgo (210 dias).

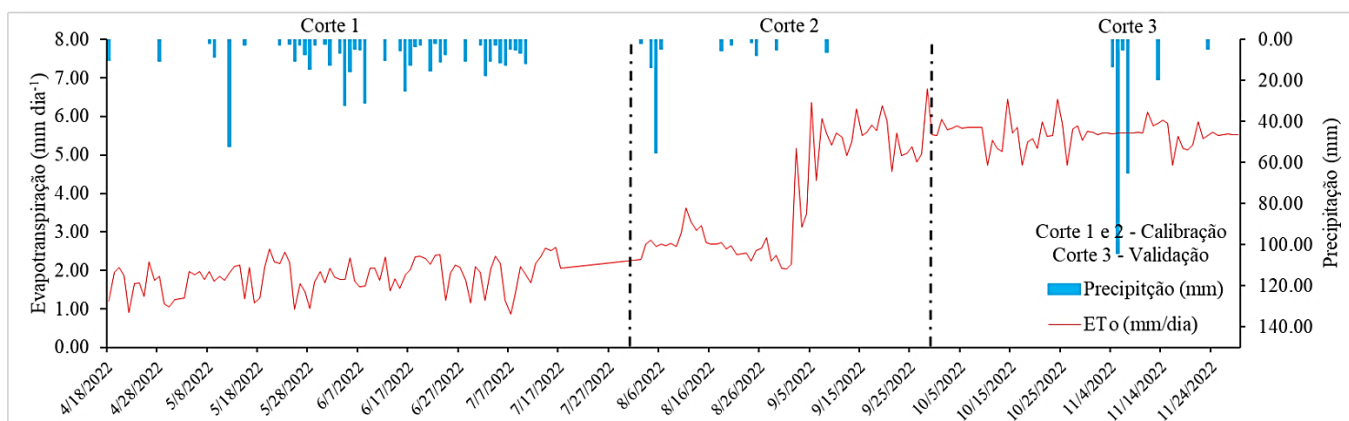


Figura 2. Evolução temporal da precipitação e evapotranspiração ao longo do período estudado

3.2 Modelagem da umidade do solo – Hydrus 1D (irrigação < capacidade de campo)

A Figura 3A apresenta o comportamento da dinâmica de umidade do solo simulada com o modelo Hydrus para a condição de manejo da irrigação de 80% da ETC sem a aplicação de cobertura morta. Os resultados mostram que o desempenho geral do modelo HYDRUS-1D foi bom em relação à simulação da umidade do solo para as duas camadas monitoradas, consistentes aos eventos de umedecimento (irrigação + precipitação) e secamento.

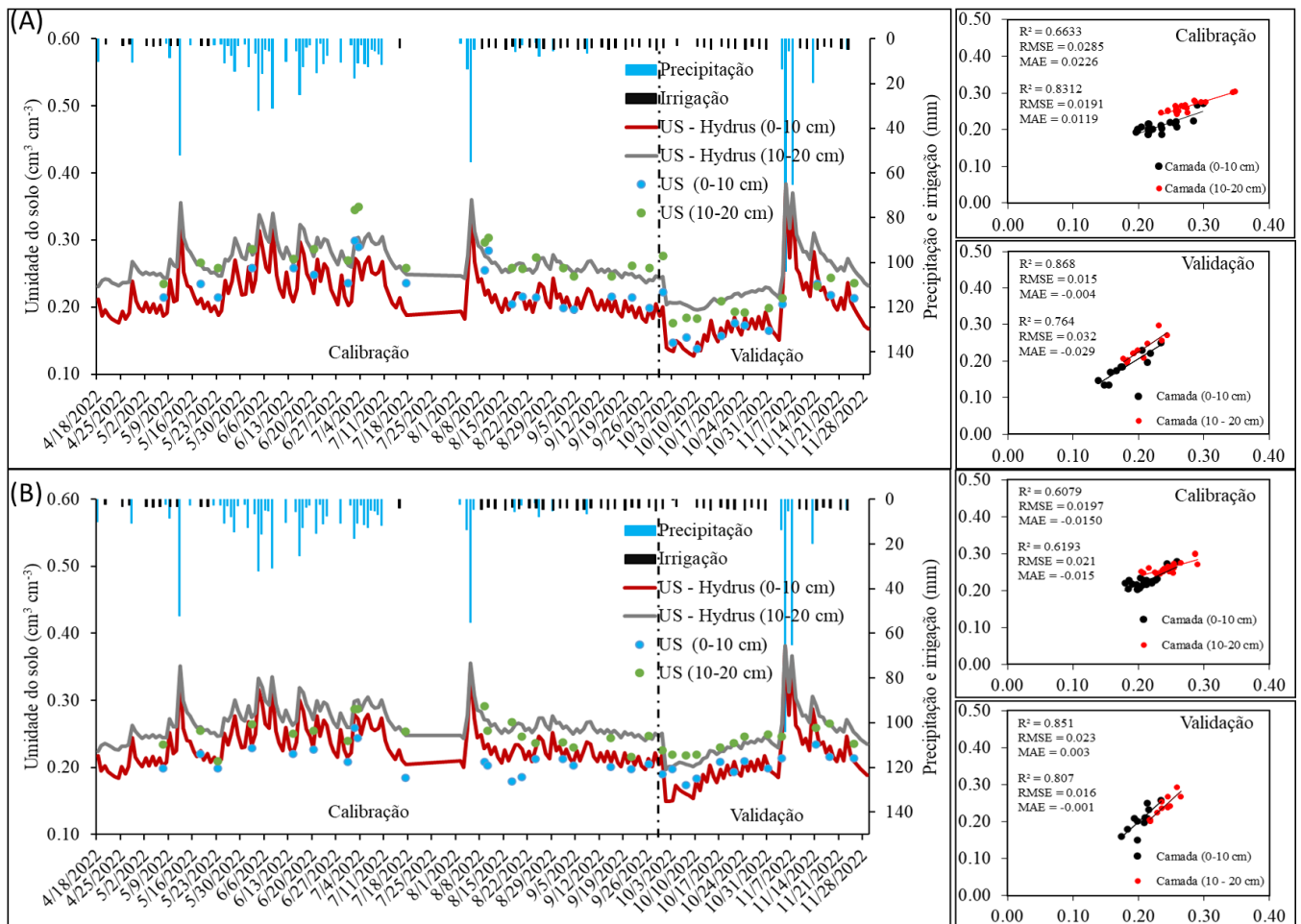


Figura 3. Dinâmica da umidade medida e simulada pelo Hydrus 1D nas condições de manejo de irrigação a 80% da ETC sem cobertura (A) e 80% da ETC com cobertura morta (B)

No período utilizado para a calibração do modelo (18/04/2022 até 30/09/2022), a umidade medida e simulada apresenta alta correlação e baixos erros associados, com erro quadrático médio (RMSE), de 0.663 e 0.020 e erro médio absolutos (MAE), de 0.022 e 0.012 para camadas de 0-10 e 10-20 cm, respectivamente (Figura B). No período correspondente a validação do modelo (01/10/2022 até 29/11/2022), observa-se que a simulação da umidade acompanhou de maneira consistente o comportamento observado nas medições ao longo de tempo, apresentando correlações adequadas e baixos erros para as duas camadas estudadas.

No tratamento correspondente a lâmina de irrigação de 80% da ETc sem cobertura morta. O coeficiente de determinação (R^2) entre os valores medidos e estimados para os dois primeiros cortes (151 dias iniciais), indicam que 61 e 62% dos valores simulados aproximam-se dos valores medidos para as camadas de 0-10 e 10-20 cm, respectivamente (Figura 3C). No entanto, no período correspondente a validação, os coeficientes de determinação apresentaram-se superiores, quando comparado com os resultados obtidos na calibração (85 e 81%). Além disso, o erro quadrático médio (RMSE), e o erro médio absolutos (MAE) foram considerados bem baixos em todo o período de avaliação (Figura 3D).

3.3 Modelagem da umidade do solo – Hydrus 1D (irrigação = capacidade de campo)

Na Figura 4, verifica-se o comportamento da dinâmica de umidade do solo simulada com o modelo Hydrus para a condição de manejo da irrigação de 100% da ETc sem cobertura morta (Figura 4A) e com a aplicação de cobertura morta (Figura 4B). Semelhante ao que foi verificado na condição de 80% da ETc, os resultados mostram que a umidade simulada se apresenta consistente aos eventos de irrigação, respondendo bem aos picos que ocorreram durante o intervalo de tempo avaliado. A umidade do solo correspondente a área que recebeu a lâmina de 80% da ETc, com aplicação da cobertura morta (Figura 3B), refletiu em uma manutenção da umidade em 24.33% e 28.05% nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, respectivamente quando comparado a área que recebeu a lâmina de 100% da ETc sem a utilização da mesma prática conservacionista.

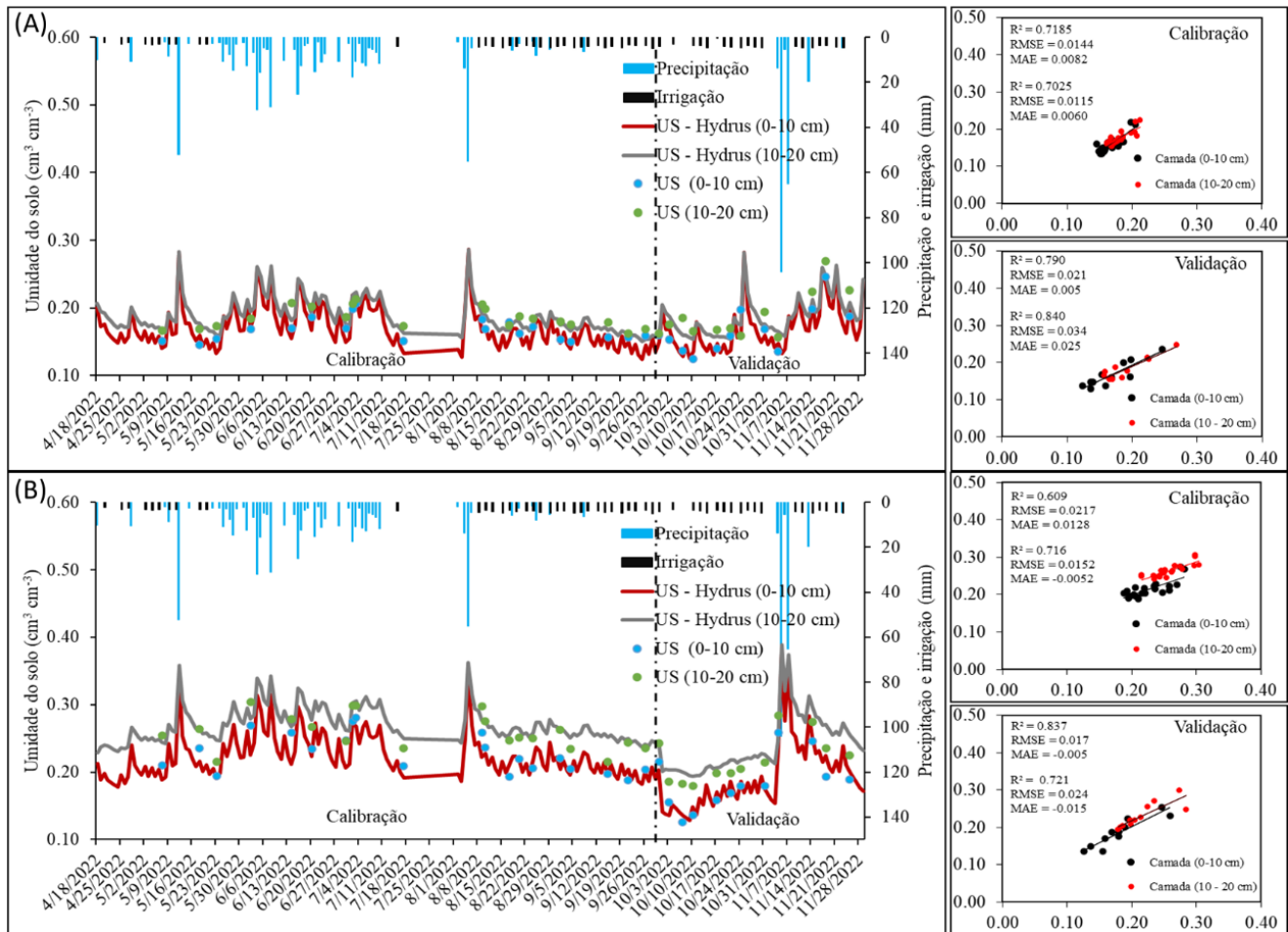


Figura 4. Dinâmica da umidade medida e simulada pelo Hydrus 1D nas condições de manejo de irrigação a 100% da ETC sem cobertura morta (A) e 100% da ETC com cobertura morta (B)

A calibração apresentou correlações satisfatórias, com coeficientes de determinação de 0,72 e 0,70 e baixos erros, com valores de RMSE de 0,014 e 0,011 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e valores de MAE de 0,008 e 0,0060 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para ambas as camadas nos tratamentos sem cobertura morta (Figura 4C). E coeficientes de determinação de 0,61 e 0,71 e valores de RMSE de 0,022 e 0,015 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e valores de MAE de 0,013 e 0,005 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para ambas as camadas nos tratamentos com cobertura morta (Figura 4E).

Na validação, foi observado que, para a condição sem cobertura morta, o R^2 entre os valores medidos e estimados indica que 0,79 e 0,84 dos valores simulados aproximam-se dos valores medidos para as camadas de 0-10 e 10-20 cm, respectivamente (Figura 4D). Na condição com cobertura morta, esses valores passaram a ser de 0,84 e 0,72, indicando que, para ambas as situações, o modelo apresentou excelentes resultados em termos de predição da umidade do solo (Figura 4F).

3.4 Modelagem da umidade do solo – Hydrus 1D (irrigação > capacidade de campo)

Na condição de aplicação de 120% da ET_c (Figura 5), o modelo apresentou adequada eficiência na simulação da umidade do solo na área sem cobertura morta, com baixo erro quadrático médio (RMSE), de 0.015 e 0.011 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e erro médio absolutos (MAE), de -0.002 e -0.003 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para camadas de 0-10 e 10-20 cm, respectivamente (Figura 5C). Para a área com cobertura morta (Figura 5E), o modelo também apresentou adequada eficiência, exibindo baixos valores de RMSE, de 0.016 e 0.016 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e MAE de 0.006 e 0.013 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para camadas de 10 e 20 cm, respectivamente.

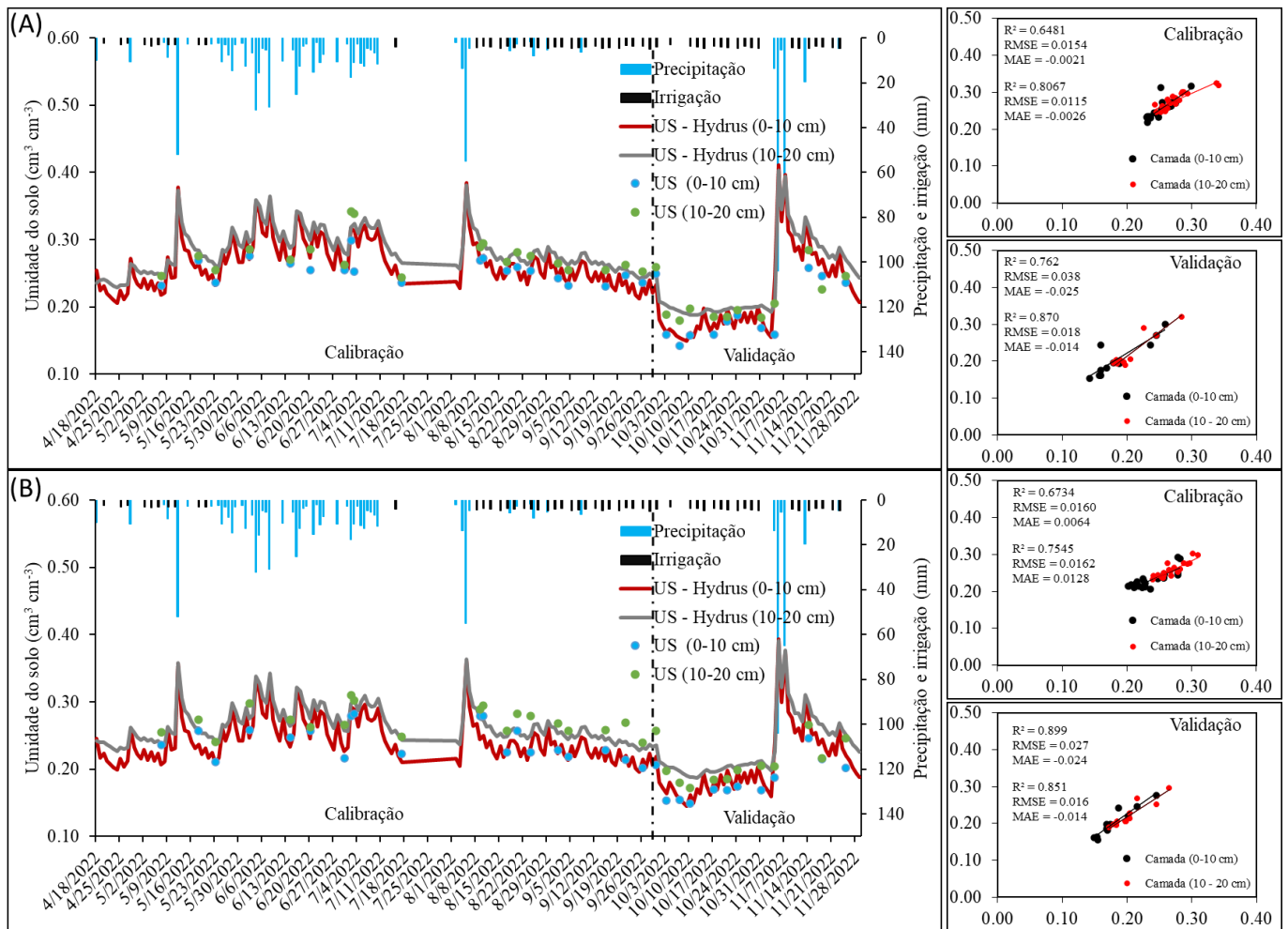


Figura 5. Dinâmica da umidade medida e simulada pelo Hydrus 1D nas condições de manejo de irrigação a 120% da ETC sem cobertura morta (A) e 120% da ETC com cobertura morta (B).

Na validação, a Figura 5D permite observar que, para a condição sem cobertura morta, o R² entre os valores medidos e estimados indica que 0,76 e 0,87 dos valores simulados aproximam-se dos valores medidos para as camadas de 0-10 e 10-20 cm, respectivamente. Na condição com cobertura morta esses valores passaram a ser 0,89 e 0,85, indicando que para ambas as situações, o modelo apresentou excelentes resultados em termos de predição da umidade do solo, todavia, os melhores coeficientes foram verificados nas camadas correspondentes a área com cobertura morta (Figura 5F). Além disso, foi verificado que na camada

mais superficial (0-10 cm), a cobertura morta possibilitou a manutenção da umidade do solo em 8,17% quando comparado com os dados de umidade do solo na área sem cobertura morta.

3.5 Modelagem da condutividade elétrica do solo – Hydrus 1D (irrigação = capacidade de campo)

Foi verificada uma tendência de superestimação dos valores de condutividade elétrica do solo pelo modelo HYDRUS – 1D, no entanto, verificou-se também que os valores medidos acompanharam a dinâmica dos valores observados (Figura 6). Além disso, no período chuvoso, verifica-se que a CE apresentou os menores valores, e isso está associado à lixiviação dos sais e lavagem do solo. Da mesma forma que no período em que foi aplicada irrigação frequente, com esgoto tratado, a salinidade teve seus maiores picos.

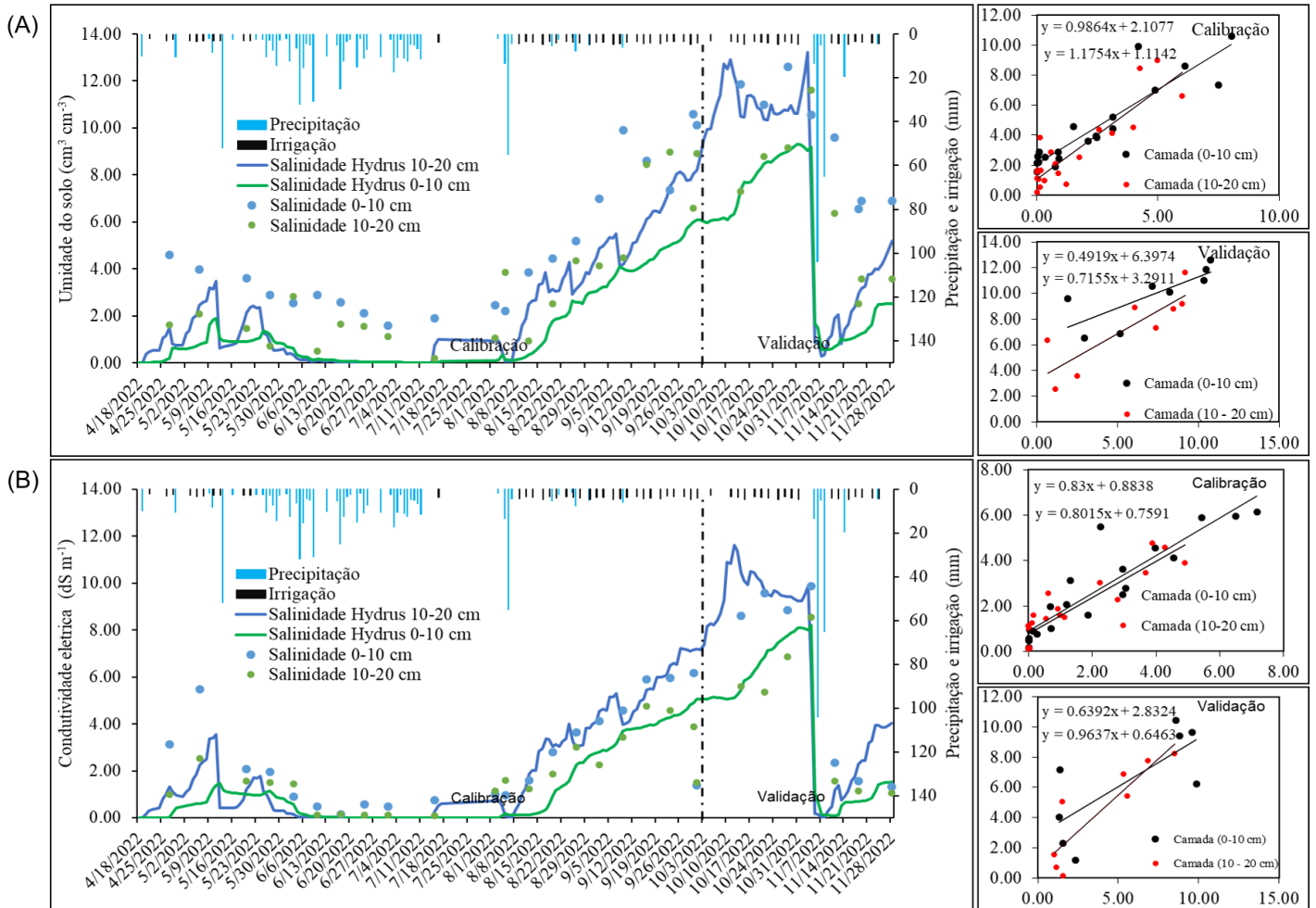


Figura 6. Dinâmica da condutividade elétrica do solo medida e simulada pelo Hydrus 1D nas condições de manejo de irrigação a 100% da ETC sem cobertura morta (A) e 100% da ETC com cobertura morta (B).

Outro resultado relevante foram as diferentes respostas da salinidade nas áreas com e sem cobertura morta. Na condição sem cobertura morta (Figura 6A), a média da salinidade foi de aproximadamente 23,36 e 30,41% superior à salinidade na condição com cobertura morta, nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, respectivamente (Figura 6B), mostrando que o uso de cobertura morta contribui como uma atenuante da salinização de solos irrigados com água residuária.

Na Tabela 5 observa-se as métricas utilizadas para avaliação do modelo. Observa-se que os valores de R^2 , RMSE e MAE se mostraram satisfatórios para ambas os tratamentos estudados em ambas as profundidades.

Tabela 5. Resultados da métricas de avaliação do modelo

	Calibração			
	Com cobertura		Sem cobertura	
	(0-10 cm)	(10-20 cm)	(0-10 cm)	(10-20 cm)
R^2	0,846	0,827	0,835	0,771
RMSE	1,031	0,842	2,340	1,859
MAE	0,526	0,496	2,075	1,389
	Validação			
	Com cobertura		Sem cobertura	
	(0-10 cm)	(10-20 cm)	(0-10 cm)	(10-20 cm)
R^2	0,551	0,781	0,619	0,714
RMSE	2,736	1,513	3,470	2,473
MAE	0,871	0,503	2,781	1,707

3.6 Modelagem da umidade do solo – Hydrus 1D (cenário de mudança climática)

Foi realizada uma avaliação dos efeitos das alterações climáticas e seu impacto na umidade e na condutividade elétrica do solo sob condições de aplicação e sem aplicação de cobertura morta (Figura 7). Para isso, foi utilizado o conjunto de dados CLIMBra, que compreende 19 projeções de modelos climáticos do CMIP6 para o território brasileiro, com base nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. O modelo adotado para essa análise foi o MIROC6 e os dados utilizados foram a ETo e a precipitação considerando o intervalo de 01/01/2025 a 31/12/2035.

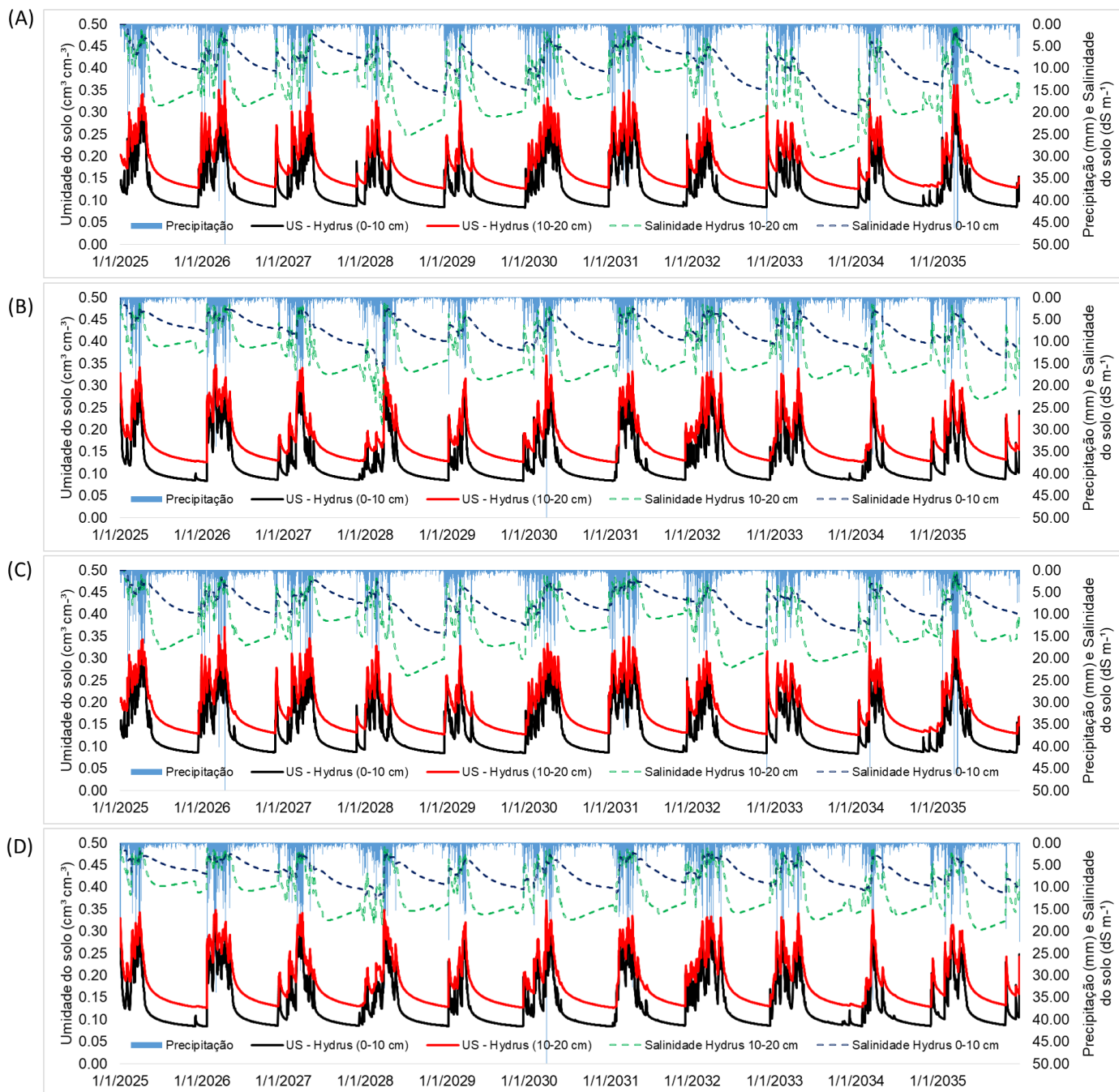


Figura 7. Dinâmica da umidade e da condutividade elétrica do solo simulada pelo Hydrus 1D em condições de alteração climática. Sem cobertura morta e cenário SSP2-4.5 (A); Sem cobertura morta e cenário SSP5-8.5 (B); Com cobertura morta e cenário SSP2-4.5 (C); Com cobertura morta e cenário SSP5-8.5 (D).

Foi observada uma resposta sensível da umidade do solo aos cenários intermediários (SSP2-4.5) e extremos (SSP5-8.5), onde verificou-se que a umidade

do solo modelada, em ambos os cenários sofreu uma redução de aproximadamente 60%. Quando comparada com a umidade atual em condições onde se utilizou a cobertura morta. Enquanto que a salinidade em todas as situações avaliadas apresentou aumento de mais de 340%, onde se verificou salinidades variando de 6,76 dS m⁻¹ no cenário SSP5-8.5 com cobertura morta, a 14,76 dS m⁻¹ no cenário SSP2-4.5 sem aplicação de cobertura morta.

É importante ressaltar que na condição de aumento na demanda evapotranspirométrica, há uma diminuição considerável da umidade do solo, e uma vez que a umidade do solo diminui, a concentração de sais presente no solo aumenta, e isso justifica o aumento verificado na condutividade elétrica no solo.

4. Discussão

4.1 Influência da cobertura morta na dinâmica da umidade do solo

A modelagem da umidade apresentou excelentes respostas em picos de precipitação nos tratamentos com e sem cobertura morta. Essa resposta está associada ao processo de infiltração considerado pelo modelo, dessa forma, a entrada de água no solo influencia diretamente a distribuição da umidade. (Figuras 3, 4 e 5). Montenegro et al. (2013) destacaram em seus estudos a interferência benéfica da cobertura morta no solo. Aires et al. (2022) avaliando a dinâmica da umidade e o estresse hídrico do solo simulado pelo modelo Hydrus-1D, em cultivo de sorgo forrageiro irrigado, na presença e ausência da cobertura morta, também verificaram que a simulação da umidade do solo apresentou elevada precisão durante o período chuvoso, em decorrência da uniformidade na distribuição de

água no perfil do solo. Os autores mencionaram a alta precisão em áreas com cobertura morta, devido à interceptação da chuva pela palhada.

Outro elemento de considerável influência na elevada precisão da previsão da umidade do solo em regiões com cobertura morta reside na dinâmica do processo de decomposição da camada superficial de material orgânico, conforme discutido por Dietrich et al. (2019), essa decomposição pode resultar em liberação variável de água no solo, introduzindo um elemento de incerteza na modelagem. Além disso, a heterogeneidade do sistema solo é um fator limitante no monitoramento da umidade. Yetbarek et al. (2020) destacaram que o efeito da estratificação do solo na dinâmica da umidade do solo, que está relacionado à formação de barreiras capilares e hidráulicas, depende da configuração da estratificação, da umidade disponível no solo e da cobertura do solo. Dessa forma, esses efeitos podem ser potencializados nas camadas mais superficiais, conforme verificado por Shekhar et al. (2019).

4.2 Influência da irrigação na dinâmica da umidade do solo

O HYDRUS-1D possui como característica a capacidade de representar detalhadamente as propriedades do solo, incluindo curva de retenção e propriedades hidráulicas. Essa representação permite simular com precisão o comportamento do solo sob condições de irrigação deficitária. Li et al. (2023) utilizaram o modelo HYDRUS-1D e dados de campo para analisar os efeitos do déficit de irrigação no crescimento das raízes do tomateiro, na absorção de água pelo solo e na utilização pela zona radicular. Os resultados permitiram concluir que

o manejo de irrigação com déficit ideal sob esta condição experimental é o que mantém o teor de água do solo entre 70-90% (capacidade de campo) no estágio I e de 40-60% (capacidade de campo) no estágio II.

González et al. (2015) estudando a modelagem da dinâmica da água no solo cultivado com milho irrigado, registraram que o modelo HYDRUS simulou com sucesso a variabilidade temporal da dinâmica hídrica do solo em tratamentos irrigados com irrigação total e deficitária, produzindo valores de raiz do erro médio quadrático (RMSE) que variaram entre 0,014 e 0,025, quando compararam o conteúdo de água no solo pela simulação do modelo com medições de campo. Moumni e Lahrouni (2022), por sua vez, objetivando estimar o teor de água e a evapotranspiração utilizando o modelo Hydrus-1D nas condições semiáridas da região de Haouz, no Marrocos, verificaram que as simulações de evapotranspiração real (ET) utilizando os dados calibrados mostraram uma superestimação do teor de água do solo. Os autores mencionaram que os resultados podem estar associados à subestimação dos dados do índice de área foliar (IAF) ou à necessidade de reajuste do módulo de extração de raízes.

Er-Raki et al. (2021) avaliando o potencial do modelo numérico Hydrus-1D para estimar a umidade do solo (θ) em diferentes profundidades, a evapotranspiração real da cultura (ETa) e seus componentes (transpiração da cultura, Ta e evaporação do solo, Ea), além da percolação profunda (DP) do trigo irrigado sob diferentes manejos hídricos na região semiárida da bacia de Tensift, verificaram que a estimativa da umidade do solo e da ETa entre as simulações Hydrus-1D e medições de campo para trigo sob diferentes manejos hídricos, apresentaram baixos valores médios de RMSE ($0,03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para θ e 0,58 mm

dia⁻¹ para ETa). Além de apresentar estimativas aceitáveis de Ea e Ta, com RMSE associado igual a 0,73 e 0,65 mm dia⁻¹, respectivamente.

4.3 Influência da irrigação na dinâmica de sais do solo

O monitoramento da salinidade de solos irrigados com água residuária desempenha um papel crucial na gestão sustentável dos recursos hídricos e na manutenção da produtividade agrícola. No estudo realizado por Nektarios et al. (2023) foi verificado que o modelo HYDRUS-1D apresentou boa precisão na simulação da umidade do solo e da condutividade elétrica (CE) na irrigação de oliveiras, com Nash-Sutcliffe e Root Mean Square Error (RMSE) dentro de faixas aceitáveis. Outro estudo utilizando o modelo HYDRUS-1D para simular a salinidade do solo em zonas de raízes de milho sob condições de irrigação salina e descobriu que o modelo teve excelente desempenho em termos de simulação do conteúdo de água do solo e CE (Farzam et al., 2022). Os autores mostraram que os intervalos de NRMSE para simulações umidade e condutividade elétrica do solo em diferentes profundidades foram de 0,003 a 0,01 e 0,09 a 0,11, respectivamente.

Yanhui et al. (2022) utilizaram o modelo HYDRUS-2D para simular a dinâmica da água e de sais em um cultivo de milho sob irrigação por gotejamento com cobertura morta, irrigação por gotejamento enterrado superficialmente e irrigação por aspersão, com precipitação variável e teor inicial de sal. Os resultados mostraram que a distribuição e a variação da água e de sais no solo foram semelhantes nas áreas irrigadas por gotejamento com cobertura morta e irrigação por gotejamento enterrado superficialmente. Foi verificado também que o modelo

HYDRUS - 2D representou com precisão a distribuição e variação da água e de sais no solo sob as diferentes técnicas de irrigação. Além disso, semelhante ao que foi encontrado (Figura 6) os autores verificaram que a quantidade de sais na camada superficial do solo aumentou com a diminuição das chuvas.

Conforme foi verificado na Figura 6, a salinidade em áreas sem cobertura morta (Figura 6A) apresentou resultado significativamente superior quando comparado com a área com cobertura morta (Figura 6B), visto que a utilização de cobertura morta é uma estratégia adequada para regular a umidade e os sais do solo, conforme foi discutido por Carey (2022).

4.4 Influência das alterações climáticas na dinâmica da umidade e salinidade elétrica do solo

Diversos estudos têm sido realizados considerando os impactos das alterações climáticas na dinâmica do fluxo de água em um perfil de solo (Šimůnek et al., 2014; Mukhala et al., 2017; Gebrechorkos et al., 2019). Os resultados dessa pesquisa permitiram observar que a umidade do solo tende a sofrer uma diminuição considerável em torno de 36,6% e 39,6%, no cenário de aumento de 1,5 °C, (Figura 7). Resultado semelhante foi encontrado por Wang et al. (2021), onde os autores verificaram que devido ao aumento da temperatura, o armazenamento total de água no solo (SWS), a evapotranspiração real (ETa), a absorção de água pelas raízes (RWU) e a evaporação real (Ea) diminuíram em comparação com o período de referência. Estudo realizado por Okello et al. (2020) teve como objetivo investigar os impactos das alterações climáticas no balanço hídrico do solo, na percolação profunda, no escoamento superficial e no conteúdo de água do solo. Os autores

mostraram que os resultados obtidos a partir do modelo Hydrus permitiram inferir que a percolação profunda e o escoamento superficial aumentem em cenários climáticos futuros.

5. Considerações finais

A estimativa da umidade com o modelo Hydrus-1D resultou em dados coerentes com os medidos em campo, apresentando elevada precisão, principalmente durante o período chuvoso.

A estimativa da salinidade do solo na condição sem cobertura morta foi superior em aproximadamente 23,36 e 30,41% quando comparada à salinidade na condição com cobertura morta, em ambas as camadas analisadas.

Os resultados encontrados com a modelagem permitiram concluir que a cobertura morta atua como mitigador da salinização de solos irrigados com esgoto tratado, sendo uma importante ferramenta na gestão dos recursos naturais.

Foi verificado que a umidade do solo modelada, em ambos os cenários (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) sofreu uma redução de aproximadamente 60%, quando comparada com a umidade atual em condições onde se utilizou a cobertura morta.

A salinidade em todas as situações avaliadas apresentou aumento de mais de 340%, variando de 6,76 dS m⁻¹, no cenário SSP5-8.5 com cobertura morta, a 14,76 dS m⁻¹ no cenário SSP2-4.5 sem aplicação de cobertura morta.

Os resultados obtidos do modelo HYDRUS-1D têm implicações práticas para a agricultura e a gestão de recursos hídricos, destacando a necessidade de adaptação às mudanças climáticas para garantir a segurança hídrica e a sustentabilidade agrícola.

Referências bibliográficas

Aboagla, Mohammed, Ibrahim, Elsiddig., Guisheng, Zhou., Guanglong, Zhu., Nimir, Eltyb, Ahmed, Nimir., Mohamed, Suliman, Eltyed, Suliman., Muhi, Eldeen, Hussien, Ibrahim., Adam, Yousif, Adam, Ali. (2023). Nitrogen fertilizer promoting salt tolerance of two sorghum varieties under different salt compositions. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 83(1):3-13. doi: 10.4067/s0718-58392023000100003

Aires, G. C.; Montenegro, A. A. A.; Carvalho, A. A.; Monteiro, A; L. N.; Almeida, G. C. Umidade Do Solo E Estresse Hídrico Simulado Com Hydrus-1d Em Área Com Sorgo Forrageiro Irrigado. *Agrometeoros*, Passo Fundo, V.30, E026992, 2022.

Ajay, Kumar, Mishra., Rajeswari, Das., Rout, George, Kerry., B., Biswal., Trisha, Sinha., Sheetalraj, Sharma., P., Arora., Mukesh, Kumar. (2023). Promising management strategies to improve crop sustainability and to amend soil salinity. *Frontiers in Environmental Science*, doi: 10.3389/fenvs.2022.962581

Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., De Moraes Gonçalves, J.L., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

Amir, Hossein, Baghdadi., F, Golzardi., Masoud, Hashemi. (2023). The Use Of Alternative Irrigation And Cropping Systems In Forage Production May Alleviate The Water Scarcity In Semiarid Regions.. *Journal Of The Science Of Food And Agriculture*, Doi: 10.1002/Jsfa.12574

André Simões Ballarin, Jullian Souza Sone, Gabriela C. Gesualdo, et al. CLIMBra - Climate Change Dataset for Brazil[DS/OL]. V4. Science Data Bank, 2024[2024-04-25]. <https://cstr.cn/31253.11.sciencedb.02316>.

CSTR:31253.11.sciencedb.02316.

Araújo Júnior, G. N., Silva, T. G. F., Souza, L. S. B., Souza, M. S., Araújo, G. G. L., Moura, M. S. B., Santos, J. P. A. S., Jardim, A. M. R. F., Andaluves, C. P., Andaluves, H. K. M. N. 2021. Productivity, Bromatological Composition And Economic Benefits Of Using Irrigation In The Forage Cactus Under Regulated Deficit Irrigation In A Semiarid Environment. *Bragantia*.80: E1221. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200390>.

Bárbara, Silveira, Leandro, de, Lima., Carlo, Aldrovandi, Torreão, Marques., Ricardo, Loiola, Edvan., Leilson, Rocha, Bezerra., J., Da, Silva, Araujo., Marcos, Jácome, de, Araújo., Romilda, Rodrigues, do, Nascimento., Francisco, Gleyson, da, Silveira, Alves. (2023). Agronomic and mineral characterization of cactus varieties under different doses of phosphorus. *Journal of The Professional Association for Cactus Development*, 25:94-108. doi: 10.56890/jpacd.v25i.455

Carolyne W. L. De Andrade; Suzana M. G. L. Montenegro; Jarbas H. De Miranda; Abelardo A. De A. Montenegro; Fred M. C. V. De Assis. Simulation Of Sodium And Potassium Dynamics By The Hydrus 2d Model In A Haplic Planosol Via Residue Water. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, V.38, N.6, P.874-884, Nov./Dec. 2018

Carvalho, A.A., Montenegro, A.A. De A., Tabosa, J.N., Almeida, T.A.B., Silva, A.G.O. Da, Silveira, A.V.M., 2020. Reuso Hidroagrícola: Uma Solução Para Convivência Com A Escassez Hídrica No Sertão E Agreste Pernambucano. *Journal Of Environmental Analysis And Progress* 5. <https://doi.org/10.24221/Jeap.5.2.2020.2841.140-150>

Chris, Carey. (2022). Buried Straw Layer Coupling Film Mulching Regulates Soil Salinity of Coastal Tidal Soil and Improves Maize (*Zea mays* L.) Growth. *Water*, doi: 10.3390/w14244119

Cornelius, Okello., Nicolas, Greggio., Beatrice, Maria, Sole, Giambastiani., Nina, Wambiji., Julius, Nzeve., Marco, Antonellini. (2020). Modelling Projected Changes

in Soil Water Budget in Coastal Kenya under Different Long-Term Climate Change Scenarios. *Water*, doi: 10.3390/W12092455

Costa, J. P. N.; Medeiros, J. F.; Nunes, R. M. A.; Cavalcante Junior, E. G.; Lira, J. F. B. Crescimento E Produção Da Primeira Rebrotada De Cultivares De Sorgo Sob Diferentes Lâminas De Irrigação. *Revista Brasileira De Milho E Sorgo*, V.16, P.449–459, 2017.

Costa, S. A. T. ; Souza, L. S. B. ; Jardim, A. M. R. F. ; Araujo Junior, G. N. ; Alves, C. P. ; Souza, C. A. A. ; Salvador, K. R. S. ; Silva, T. G. F. Da . Técnicas Hidricamente Eficientes E Modelagem: Estratégias Para A Sustentabilidade E Intensificação Da Agricultura Frente Às Mudanças Do Clima Em Ambientes Suscetíveis À Desertificação. *Revista Brasileira De Geografia Física* , V. 14, P. 1, 2021.

Emily, Jackson., R., Srinivasan. (2022). Modeling of irrigation and related processes with HYDRUS. *Advances in Agronomy*, doi: 10.1016/bs.agron.2023.05.002

Ephrem Yetbarek, Saurabh Kumar, Richa Ojh. Effects of soil heterogeneity on subsurface water movement in agricultural fields: A numerical study, *Journal of Hydrology*, Volume 590, 2020, 125420, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125420>.

Er-Raki, S.; Ezzahar, J.; Merlin, O.; Amazirh, A.; Ait Hssaine, A.; Kharrou, M. H.; Khabba, S.; Chehbouni, A. Performance Of The Hydrus-1d Model For Water Balance Components Assessment Of Irrigated Winter Wheat Under Different Water Managements In Semi-Arid Region Of Morocco. *Agricultural Water Management*, V. 244, 2021. Doi:10.1016/J.Agwat.2020.106546.

Farias, I; Lira, M. A; Santos, D. C; Fernandes, A. P. M. Paiva, M. O Consórcio De Sorgo Granífero (*Sorghum Bicolor* (L.) Moench) Com Palma Forrageira (*Opuntia Ficus Indica* Mill). *Cadernos Ômega. Série Agronomia*, Recife, N. 2, P. 131-145, 1986.

Farzam, Moghbel., Abolfazl, Mosaedi., Jonathan, Aguilar., Bijan, Ghahraman., Hossein, Ansari., Maria, C., Gonçalves. (2022). Bayesian Calibration and

Uncertainty Assessment of HYDRUS-1D Model Using GLUE Algorithm for Simulating Corn Root Zone Salinity under Linear Move Sprinkle Irrigation System. *Water*, 14(24):4003-4003. doi: 10.3390/w14244003

Feddes, R.A.; Kovalik, P.J.; Zaradny, H. Simulation Of Field Water Use And Crop Yield. New York: John Wiley & Sons. 188 P. 1978.

Fernández, Bremón,, José. (2023). Remotely Sensed Soil Moisture Can Capture Dynamics Relevant to Plant Water Uptake. *Water Resources Research*, doi: 10.1029/2022wr033814

Freitas, P. S. L.; Mantovani, E. C.; Sedyama, G. C.; Costa, L. C. Efeito Da Cobertura De Resíduo Da Cultura Do Milho Na Evaporação Da Água Do Solo. *Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental*, V. 8, N. 1, P. 85-91, 2004.

Frota, M. N. L. Da; Carneiro, M. S. De S.; Carvalho, G. M. C.; Araujo Neto, R. B. De Palma Forrageira Na Alimentação Animal - Teresina : Embrapa Meio-Norte, 2015. 47 P. ; 21 Cm. - (Documentos / Embrapa Meio-Norte, Issn 0104-866x ; 233).

Gebrechorkos, S.H.; Hülsmann, S.; Bernhofer, C. Statistically downscaled climate dataset for East Africa. *Sci. Data* 2019, 6, 2–9.

González, M. G.; Ramos, T. B.; Carlesso, R. C.; Paredes, P.; Petry, M. T.; Martins, J. D.; Aires, N. P.; Pereira, L. S. Modelling Soil Water Dynamics Of Full And Deficit Drip Irrigated Maize Cultivated Under A Rain Shelter. *Biosystems Engineering*, V. 1, N. 32, P. 1-18, 2015.

Guilherme Dietrich, Sylvie Recous, Patrick Leal Pinheiro, Douglas Adams Weiler, Adriane Luiza Schu, Mathias Roberto Leite Rambo, Sandro José Giacomini, Gradient of decomposition in sugarcane mulches of various thicknesses, *Soil and Tillage Research*, Volume 192, 2019, Pages 66-75, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.022>.

J., Somasundaram., M., Salikram., M., Salikram., Nishant, K., Sinha., M., Mohanty., R., S., Chaudhary., Ram, C., Dalal., N., G., Mitra., D., Blaise., M., V., Coumar., K., M., Hati., Jyoti, Kumar, Thakur., S., Neenu., A.K., Biswas., Ashok, K., Patra., Suresh, Kumar, Chaudhari. (2019). Conservation agriculture effects on soil

properties and crop productivity in a semiarid region of India. *Soil Research*, doi: 10.1071/SR18145

Jardim, A. M. R. F., Silva, T. G. F., Souza, L. S. B., Araújo Júnior, G. N., Alves, H. K. M. N., Souza, M. S., Araújo, G. G. L., & Moura, M. S. B. (2021b). Intercropping Forage Cactus And Sorghum In A Semi-Arid Environment Improves Biological Efficiency And Competitive Ability Through Interspecific Complementarity. *Journal Of Arid Environments*, 188, 104464.

Jardim, A.M. Da R.F., Da Silva, T.G.F., De Souza, L.S.B., Souza, M. De S., De Moraes, J.E.F., Araújo, G.D.N., 2020. Multivariate Analysis In The Morpho-Yield Evaluation Of Forage Cactus Intercropped With Sorghum. *Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental* 24. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/Agriambi.V24n11p756-761>

Jiaxin, Wang., Xiaodong, Gao., Yanqing, Zhou., Pute, Wu., Xining, Zhao. (2020). Impact of conservation practices on soil hydrothermal properties and crop water use efficiency in a dry agricultural region of the tibetan plateau. *Soil & Tillage Research*, doi: 10.1016/J.STILL.2020.104619

Justi, A. L.; Vilas Boas, M. A.; Sampaio, S. C. Índice De Capacidade Do Processo Na Avaliação Da Irrigação Por Aspersão. *Engenharia Agrícola*, V.30, P.264-270, 2010.

Kaiwen, Chen., Shuang-en, Yu., Tao, Ma., Jihui, Ding., Pingru, He., Yao, Li., Yan, Dai., Guangquan, Zeng. (2022). Modeling the Water and Nitrogen Management Practices in Paddy Fields with HYDRUS-1D. *Agriculture*, 12(7):924-924. doi: 10.3390/Agriculture12070924

Kuindra Iriyanta, Bambang Purnomosidi Dwi Putranto, Widyastuti Andriyani. (2023). lot based soil moisture monitoring and soil moisture prediction using linear regression (case study of vinca plants). doi: 10.26798/jiss.v2i1.929

Li, Y.; Šimůnek, J.; Jing, L.; Zhang, Z.; Ni, L. Evaluation of water movement and water losses in a direct-seeded-rice field experiment using HYDRUS-1D. *Agric. Water Manag.* 2014, 142, 38–46.

Macêdo, K. G. Simulação Da Extração De Água Do Solo Pela Cultura Do Milho (Zea Mays L.) Utilizando Modelo Hydrus-1d. Dissertação. Universidade Federal Do Ceará. Fortaleza. 67 P. 2018.

Mohamad, Hejazi., Silvia, R., Santos, Da, Silva., Fernando, Miralles-Wilhelm., Son, H., Kim., Page, Kyle., Yaling, Liu., Chris, R., Vernon., Alison, Delgado., Jae, Edmonds., Leon, Clarke. (2023). Impacts Of Water Scarcity On Agricultural Production And Electricity Generation In The Middle East And North Africa. *Frontiers In Environmental Science*, Doi: 10.3389/Fenvs.2023.1082930

Montenegro, A.A.A., Abrantes, J.R.C.B., De Lima, J.L.M.P., Singh, V.P., Santos, T.E.M., 2013. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. *Catena (Amst)* 109. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.03.018>

Moumni, A. and Lahrouni, A.: Towards a calibration of the HYDRUS-1D model on a wheat crop in the semi-arid conditions of Haouz region, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-3121, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-3121>, 2022.

Mualem, Y. A. A New Model For Predicting The Hydraulic Conductivity Of Unsaturated Porous Media. *Water Resources Research*, V. 12, N. 3, P. 2187-2193, 1976. Doi:10.1029/Wr012i003p00513.

Muhammad, Muhitur, Rahman., Alireza, Aghajani, Shahrivar., Dharma, Hagare., Basant, L, Maheshwari. (2022). Impact of Recycled Water Irrigation on Soil Salinity and Its Remediation. *Soil systems*, doi: 10.3390/soilsystems6010013

Mukhala, E.; Ngaina, J.N.; Maingi, N.W. Downscaled Climate Analysis on Historical, Current and Future Trends in the East African Community Region. *Kenya Inst. Policy Res. Anal.* 2017, 21, 1–57.

N, Badni., S, Hamoudi., Abdulrahman, Ali, Alazba., Mohammad, N., El-Nesr. (2018). Simulations of Soil Moisture Distribution Patterns Between Two Simultaneously-Working Surface Drippers Using Hydrus-2D/3D Model. *International journal of engineering and technology*, doi: 10.21817/IJET/2018/V10I2/181002076

Nektarios, N., Kourgialas., Giasemi, G., Morianou., Myron, Tuman. (2023). Assessing soil moisture and salinity dynamics in an irrigated olive orchard using the HYDRUS 2D/3D model. doi: 10.5194/egusphere-egu23-15080

Nektarios, N., Kourgialas., Giasemi, G., Morianou., Myron, Tuman. (2023). Assessing soil moisture and salinity dynamics in an irrigated olive orchard using the HYDRUS 2D/3D model. doi: 10.5194/egusphere-egu23-15080

Pereira, A. R.; Villa Nova, N.; Pereira, A. S.; Barbieri, V. A model for the class A pan coefficient. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v. 76, n. 2, p. 75-82, 1995.

R.J., Harper., Bernard, Dell., J.K., Ruprecht., S.J., Sochacki., Keith, Smettem., Keith, Smettem. (2020). Salinity and the reclamation of salinized lands. 193-208. doi: 10.1016/B978-0-12-813193-0.00007-2

Reddy, Nk, Rakhonde, G., Purushotham, P., Patel, Ps, Ahale, S. (2023). Impact Of Climate Change On Forage Crop Production With Special Emphasis On Diseases And Mitigation Strategies Through Breeding And Molecular Approaches. In: Singhal, Rk, Ahmed, S., Pandey, S., Chand, S. *Molecular Interventions For Developing Climate-Smart Crops: A Forage Perspective*. Springer, Singapura. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1858-4_4

S., Kumar., Rajesh, Kumar. (2023). Climate Resilient Water Management For Sustainable Agriculture. *International Journal Of Environment And Climate Change*, Doi: 10.9734/ijecc/2023/V13i71894

Salvador, K. R. S. ; Jardim, A. M. R. F. ; Araujo Junior, G. N. ; Alves, C. P. ; Pinheiro, A. G. ; Pereira, R. C. G. ; Souza, Luciana Sandra Bastos ; Silva, T. G. F. Da . 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, P. 2322-2343, 2021.

Santos, C. S.; Montenegro, A. A. A.; Santos, M. A.; Pedrosa, E. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo da Moringa oleifera no semiárido Pernambucano. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.21, n.12, p.840–845, dez. 2017.

Santos, K. S.; Montenegro, A. A. De A.; Almeida, B. G. De; Montenegro S. M. G. L.; Andrade, T. Da S.; Fontes Júnior, R. V. De P. Variabilidade Espacial De Atributos Físicos Em Solos De Vale Aluvial. *Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental*, V.16, P.828-835, 2012.

Sertan, Avci., Engin, Yurtseven. (2022). Modeling Soil Profile Salinity with HYDRUS-1D. *Selcuk journal of agriculture and food sciences*, doi: 10.15316/sjafs.2022.037

Silva, J. R. L.; Montenegro, A. A. A.; Monteiro, A. L. N.; Silva Junior, V. P. Modelagem Da Dinâmica De Umidade Do Solo Em Diferentes Condições De Cobertura No Semiárido Pernambucano. *Revista Brasileira De Ciências Agrárias*, V. 10, N. 2, P. 293-303, 2015. Doi:10.5039/Agraria. V10i2a4219.

Silva, Thieres George Freire, De Medeiros, R.S., Arraes, F.D.D., Ramos, C.M.C., Araújo Júnior, G. Do N., Jardim, A.M. Da R.F., Alves, C.P., Campos, F.S., Da Silva, M.V., De Moraes, J.E.F., De Souza, C.A.A., Siqueira E Silva, S.M., Dos Santos, D.C., De Carvalho, A.A., De Souza, L.S.B., 2023b. Cactus–Sorghum Intercropping Combined With Management Interventions Of Planting Density, Row Orientation And Nitrogen Fertilisation Can Optimise Water Use In Dry Regions. *Science Of The Total Environment* 895, 165102. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165102>

Tekuametwork, Fikadu., Ermias, Teferi., Berihun, Dubale., Bukho, Gusha., Sukhmani, K., Mantel., Jane, Tanner., C., Palmer., Zerihun, Woldu., Tena, Alamirew., Gete, Zeleke. (2022). Implications of Watershed Management Practices on Water Availability Using Hydrus-1D Model in the Aba Gerima Watershed, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Water*, doi: 10.3390/w14193095

Thieres, George, Freire, da, Silva., Alexandre, Maniçoba, da, Rosa, Ferraz, Jardim., Wellington, Jairo, da, Silva, Diniz., Luciana, S., B., de, Souza., George, do, Nascimento, Araújo, Júnior., G., T., D., Silva., Cleber, Pereira, Alves., Carlos, André, Alves, de, Souza., José, Edson, Florentino, de, Moraes. (2023). Profitability of using irrigation in forage cactus-sorghum intercropping for farmers in semi-arid environment. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 27(2):132-139. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v27n2p132-139

Van Genuchten, M.T. A Closed Form Equation For Predicting The Hydraulic Conductivity Of Unsaturated Soils. Soil Science Society Of America Journal, Madison, V.44, P. 892-898, 1980.

Xiaofang, Wang., Yi, Li., Xinguo, Chen., Haoran, Wang., Linchao, Li., Ning, Yao., De, Li, Liu., De, Li, Liu., Asim, Biswas., Shikun, Sun. (2021). Projection of the climate change effects on soil water dynamics of summer maize grown in water repellent soils using APSIM and HYDRUS-1D models. Computers and Electronics in Agriculture, 185:106142-. doi: 10.1016/J.COMPAG.2021.106142

Xufeng, Li., Juanjuan, Ma., Xihuan, Sun., Lijian, Zheng., Ruixia, Chen., Jianglong, An. (2023). Estimating the Effects of Deficit Irrigation on Water Absorption and Utilization of Tomatoes Grown in Greenhouse with Hydrus-1D Model. Sustainability, doi: 10.3390/su15043216

Yanhui, Jia., Wei, Gao., Xiulu, Sun., Yayang, Feng. (2023). Simulation of Soil Water and Salt Balance in Three Water-Saving Irrigation Technologies with HYDRUS-2D. Agronomy, 13(1):164-164. doi: 10.3390/agronomy13010164