



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA
DOUTORADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

FRANCYELLE GURGEL DE CASTRO ALVES

**CULTIVO DE MORINGA SOB ESTRESSE ABIÓTICO: UMA
ABORDAGEM SUSTENTÁVEL PARA ALIMENTAÇÃO ANIMAL
NO SEMIÁRIDO**

**MOSSORÓ – RN
2025**

FRANCYELLE GURGEL DE CASTRO ALVES

**CULTIVO DE MORINGA SOB ESTRESSE ABIÓTICO: UMA
ABORDAGEM SUSTENTÁVEL PARA ALIMENTAÇÃO ANIMAL
NO SEMIÁRIDO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Manejo de Solo e Água da Universidade Federal
Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do
título de Doutora em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Tecnologia em Nutrição de
Plantas e Soluções para a Convivência com a Seca e
Salinidade.

Orientador: Prof. Dr. José Francismar de Medeiros

Coorientador: Profa. Dra. Liz Carolina da Silva Lagos
Cortes Assis

MOSSORÓ
2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade da autora, sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e sua respectiva autora sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

A474c Alves, Francielle Gurgel de Castro .
Cultivo de moringa sob estresse abiótico: uma
abordagem sustentável para alimentação animal no
semiárido / Francielle Gurgel de Castro Alves. -
2025.
109 f. : il.

Orientador: José Francismar de Medeiros.
Coorientador: Liz Carolina da Silva Lagos
Cortes Assis.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural
do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Manejo de Solo e Água, 2025.

1. Estresse hídrico. 2. Forragem. 3.
Salinidade. 4. Semiárido. 5. Suplementação
alimentar. I. Medeiros, José Francismar de,
orient. II. Assis, Liz Carolina da Silva Lagos
Cortes, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pela autora.

Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência

Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva

CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

FRANCYELLE GURGEL DE CASTRO ALVES

CULTIVO DE MORINGA SOB ESTRESSE ABIÓTICO: UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL PARA ALIMENTAÇÃO ANIMAL NO SEMIÁRIDO

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Doutora em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Tecnologia em Nutrição de Plantas e Soluções para a Convivência com a Seca e Salinidade.

Defendida em: 18/12/2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



JOSE FRANCISMAR DE MEDEIROS

Data: 20/02/2026 22:43:17-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

José Francismar de Medeiros, Prof. Dr. (UFERSA)

Presidente

Documento assinado digitalmente



RAFAEL OLIVEIRA BATISTA

Data: 23/02/2026 18:57:53-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rafael Batista Oliveira, Prof. Dr. (UFERSA)

Membro Examinador

Documento assinado digitalmente



LIZ CAROLINA DA SILVA LAGOS CORTES ASSIS

Data: 23/02/2026 17:17:25-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Liz Carolina da Silva Lagos Cortes Assis, Profa. Dra. (UFERSA)

Membro Examinador

Francisco Assis de Oliveira, Prof. Dr. (UFERSA)

Membro Examinador

Welka Preston Leite Batista da Costa, Prof. Dra. (UERN)

Membro Examinador Externo

Documento assinado digitalmente



KALINE DANTAS TRAVASSOS

Data: 24/02/2026 10:25:35-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Kaline Dantas Travassos, Prof, Dra. (INSA)

Membro Examinador Externo

Dedico ao meu esposo Raphael Estrela, sempre
presente e vibrando com minhas conquistas.

Ofereço aos meus filhos, Ana Cecilia e Raphael
Gurgel, como incentivo ao Saber e Aprendizado. O
saber nos permite decidir, e isto, quando
fundamentado, é libertador.

AGRADECIMENTOS

Minha família: Raphael Estrela, Raphael Gurgel e Ana Cecília. Meu porto seguro diário! Minha maior satisfação é voltar pra casa e encontrá-los diariamente.

À minha mãe Noelia Gurgel, pela eterna motivação a aprender e buscar realizar sonhos através dos estudos. Sem seu trabalho e empenho na minha infância e adolescência, eu não estaria onde estou agora.

Ao meu irmão George, por ser sempre tranquilo e trazer a paz necessária pros meus turbilhões de pensamentos... Obrigada, meu irmão, por sempre me ouvir e me aconselhar quando preciso.

Minha segunda mãe Fátima Gurgel, a senhora e minha mãe foram as melhores educadoras que eu pude ter. Cada uma com sua particularidade, mas sempre com carinho e atenção ímpar aos cuidados necessários para uma criança e adolescente. Muito obrigada pela incumbência em me educar!

Aos meus irmãos necessários Sidney e Giselle. Vê-los escutar com paciência os percalços do meu doutorado e dizer “vai dar tudo certo”, acalma meu coração sempre!

Aos meus sobrinhos: Waleska, Ana Beatriz, João Emanuel, Pedro, Letícia, Heloy, Arthur, Sofia, Lara, Júlia, Noah, Ester, Felipe, Maria Rita e Zuri. Eu amo acompanhar o desenvolvimento de vocês e viver momentos maravilhosos que engradem meu lazer quando estão por perto.

Meu sogro Domingos Alves e minha sogra Zélia Estrela pelos cuidados como minha filha Ana Cecília para que eu pudesse concluir minha graduação e tornar-me Zootecnista.

Minhas cunhadas Rafaela e Tuana pelos cuidados com meus sobrinhos amados e pelas conversas descontraídas que me auxiliaram em vários momentos durante a execução deste trabalho.

Minha cunhada Emmanuela (*in memoriam*) exemplo de profissional e de carreira acadêmica no curto tempo que estivemos juntas, conviver contigo foi muito prazeroso.

Meu tio Bidiu (*in memoriam*), meu grande incentivador a ser o que quisesse, nem que fosse um passarinho. Estou voando tio, e é tão bom quanto sua referência na minha infância.

Meus avós Nicanor (*in memoriam*) e Vilauba (*in memoriam*), meus tios e primos por serem cuidadosos comigo durante a vida.

Aos meus amigos queridos da vida: Monique Leiva e Estevão Pimentel, Bernardo Vasconcelos e Mariana Lima, Adalberto Barreira e Thais Barreira, Isabelle Veríssimo e Vladimir Castro, Martina Dieb, Paula Suely, Marina Leite e Antônio Lincoln. Não tem como não incluir vocês a esta conquista. Muito obrigada pelo apoio e cuidado sempre!

Aos Zootecnistas e profissionais da Ciências Agrárias que estiveram comigo na estrada profissional em momentos distintos, sempre valorizando nossa profissão e meus esforços de

aprender e desenvolver minhas competências profissionais: Prof. Dr. Alexandre Paula Braga, Prof. Dr. Gastão Espíndola, Prof. Dr. Ednardo Rodrigues Freitas, Prof. Dr. Weverton Pacheco, Prof. Dr. Paulo César Lopes, Anna Beatriz Rego, Rachel Fernandes, Larissa Costa, Ivan Quevedo, Vilauba Sobreira, Jefter Arnon, Marcondes Alves, Vilma Amâncio, Tatiana Barreto, Luiz Odonil, e minha sobrinha Ana Beatriz.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Francismar de Medeiros pelos ensinamentos e dedicação ao meu aprendizado e a esta pesquisa, principalmente pelo acolhimento e paciência nos dias difíceis.

A minha amiga e companheira de pesquisa Jéssica Castro. Sua garra e perseverança foram inspirações na caminhada durante os 24 meses de experimento juntas. Um grande presente que ganhei do doutorado e pretendo preservar por toda a vida!

Aos meus amigos e orientados de Prof. Francismar: Rodrigo Rafael, Francimar Maik, Isabella, Fagner, Gabriela, Carla Jamile, Dárcio e Mateus sempre muito dispostos a auxiliar nas atividades práticas e laboratoriais desta pesquisa.

Aos meus colegas de trabalho: Rachel, Hérica Rocha, Oseas Pereira, Tiago Chacon, Marcio Sérgio, Francisco Souza, Alcidemar Carlos, Eguinaldo por toda presteza e paciência durante a execução deste trabalho.

Ao meu colega de trabalho Antonio de Moraes e sua esposa Aurineide. Obrigada pela torcida, pela enorme ajuda e pela amizade conquistada.

Ao coordenador do Programa de Pós Graduação em Manejo de solo e água prof. Dr. Daniel Valadão sempre solícito a todos os alunos.

Aos membros da banca Profa. Dra. Liz Carolina da Silva Lagos Cortes Assis, Prof. Dr. Rafael Batista Oliveira, Prof. Dr. (UFERSA), Francisco Assis de Oliveira, Prof. Dr. (UFERSA), Prof. Dra. Welka Preston Leite Batista da Costa Alves, Prof, Dra. Kaline Dantas Travassos.

À Universidade Federal Rural do Semi-árido, ao Centro de Ciências Agrárias e ao Programa de Pós-graduação de Manejo de solo e Água pela oportunidade e conveniência em cursar o doutorado nesta Universidade.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Agricultura Sustentável no Semiárido Tropical (INCTAGRIS) pelo suporte institucional e financeiro no desenvolvimento desta Pesquisa.

Aos não menos importantes, animais que me acompanham e tranquilizam meu ser: Tita, Binho, Leco, Bob, Scott, Bob e Tequila, meus cachorros; Pingo Gabi, Mimi, Lila, Café e Mimosinho meus gatinhos; Vilu, porquinha da Índia. O amor dos animais é incondicional e cura qualquer ferida!

“Foi o tempo que perdeste com tua rosa que a fez tão importante”
Antoine de Saint-Exupéry

“O sertanejo é, acima de tudo, um forte”
Euclides da Cunha

RESUMO GERAL

A *Moringa oleifera* Lam, planta originária dos Himalaias, destaca-se por sua adaptabilidade a climas áridos e semiáridos, além de múltiplas potencialidades incluindo o tratamento de água, alimentação animal e humana, indústria farmacêutica e cosmético. Objetivou-se avaliar os efeitos dos níveis de salinidade da água até $4,5 \text{ dS m}^{-1}$ e déficit de irrigação até 33%ETc na dinâmica de acúmulo de sais no solo, no desenvolvimento vegetativo, na produção quantitativa e qualitativa de biomassa da moringa, bem como seu potencial forrageiro para alimentação animal no semiárido brasileiro. O experimento foi conduzido em área de 0,3 ha, adotando delineamento experimental em blocos casualizados em esquema fatorial $3 \times 3 + 1$, durante 555 dias de cultivo após o transplantio. Os tratamentos consistiram na combinação de três lâminas de irrigação relacionadas a evapotranspiração da cultura ($L_1 = 33\%$; $L_2 = 66\%$; $L_3 = 100\%$ ETc) e três níveis de salinidade da água ($S_1 = 0,5$; $S_2 = 2,5$; $S_3 = 4,5 \text{ dS m}^{-1}$), aplicados via irrigação localizada, além de um tratamento controle sem irrigação após 60 dias o transplantio. O Capítulo I apresentou a umidade do solo e os coeficientes da cultura através do monitoramento diário por tensiômetros, e avaliou a dinâmica de sais no solo submetido a irrigação deficitária a partir de 33%ETc com água de salinidade até $4,5 \text{ dS m}^{-1}$ em condições semiáridas a partir de avaliações semestrais dos parâmetros químicos do solo (pH, CE e acúmulo de sais). Os valores de tensões da água no solo detectaram estresse hídrico na zona radicular de L_1 , enquanto o coeficiente de cultura apresentou-se inferior a 0,5 até o segundo ano de cultivo. O monitoramento da salinidade do solo evidenciou o maior acúmulo de sais no solo no tratamento L_2 , enquanto L_1 minimizou a deposição de sais no solo e L_3 proporcionou lixiviação dos sais aplicados via água de irrigação. A alternância do período chuvoso com os secos e o método de irrigação por microtubos favoreceram a estabilidade do pH. O Capítulo II avaliou os parâmetros morfofisiológicos de altura das plantas, diâmetro do caule, produção de matéria verde e seca da moringa cultivada em condições deficitárias de irrigação, a partir de restrição hídrica até 33%ETc ou salinidade de até $4,5 \text{ dS m}^{-1}$, em intervalos de 60 dias, analisando seu potencial forrageiro no semiárido brasileiro. Os resultados demonstraram que a disponibilidade hídrica exerceu influência significativa na produção de biomassa, com incrementos na matéria verde e seca proporcionalmente ao aumento da lâmina de irrigação. O Capítulo III associa a produtividade obtida e a composição química da forragem, aprofundando a discussão técnico-científica sobre a composição química da biomassa produzida, avaliando seu potencial forrageiro quando cultivada em condições semiáridas. Embora a salinidade de $2,5 \text{ dS m}^{-1}$ tenha aumentado o rendimento em matéria seca, reduziu seu potencial digestível da fibra em detergente ácido, hemicelulose e lignina. A adoção de lâminas deficitárias até 66%ETc integrada com água salobra de $2,5 \text{ dS m}^{-1}$ mostrou-se a estratégia de manejo eficiente para mitigar os efeitos negativos da salinidade sobre a parede celular e manter um perfil fibroso mais adequado para a alimentação de ruminantes. Portanto, a moringa apresentou-se como alternativa sustentável para sistemas agrícolas em ambientes semiáridos e possibilidade de suplementação alimentar para ruminantes em regiões com escassez hídrica e disponibilidade limitada de água de boa qualidade.

Palavras-chave: Estresse hídrico. Forragem. Salinidade. Semiárido. Suplementação alimentar

GENERAL ABSTRACT

Moringa oleifera Lam., a plant native to the Himalayas, stands out for its adaptability to arid and semi-arid climates, along with multiple potential uses including water treatment, animal and human nutrition, and the pharmaceutical and cosmetic industries. This study aimed to evaluate the effects of irrigation water salinity levels up to 4.5 dS m^{-1} and irrigation deficit up to 33% ETc on soil salt accumulation dynamics, vegetative development, quantitative and qualitative biomass production of moringa, as well as its forage potential for animal nutrition in the Brazilian semi-arid region. The experiment was conducted in a 0.3 ha area, adopting a randomized block design in a $3 \times 3 + 1$ factorial scheme, over a 555-day cultivation period after transplanting. Treatments consisted of a combination of three irrigation depths related to crop evapotranspiration ($L_1 = 33\%$; $L_2 = 66\%$; $L_3 = 100\%$ ETc) and three levels of water salinity ($S_1 = 0.5$; $S_2 = 2.5$; $S_3 = 4.5 \text{ dS m}^{-1}$), applied via localized irrigation, plus a control treatment without irrigation after 60 days post-transplanting. Chapter I presented soil moisture and crop coefficients through daily monitoring with tensiometers, and evaluated the salt dynamics in soil subjected to deficit irrigation starting at 33% ETc with water salinity up to 4.5 dS m^{-1} under semi-arid conditions, based on semi-annual assessments of soil chemical parameters (pH, EC, and salt accumulation). Soil water tension values detected water stress in the root zone of L_1 , while the crop coefficient remained below 0.5 until the second year of cultivation. Soil salinity monitoring revealed the highest salt accumulation in the L_2 treatment, whereas L_1 minimized salt deposition in the soil and L_3 promoted leaching of salts applied via irrigation water. The alternation of rainy and dry periods, along with the microtube irrigation method, favored pH stability. Chapter II evaluated the morphophysiological parameters of plant height, stem diameter, and fresh and dry matter production of moringa grown under deficit irrigation conditions, with water restriction up to 33% ETc or salinity up to 4.5 dS m^{-1} , at 60-day intervals, analyzing its forage potential in the Brazilian semi-arid region. The results demonstrated that water availability significantly influenced biomass production, with increases in fresh and dry matter proportional to the irrigation depth. Chapter III associates the obtained productivity with the forage chemical composition, deepening the technical-scientific discussion on the chemical composition of the produced biomass and evaluating its forage potential when cultivated under semi-arid conditions. Although salinity of 2.5 dS m^{-1} increased dry matter yield, it reduced the digestible fiber potential in terms of acid detergent fiber, hemicellulose, and lignin. The adoption of deficit irrigation depths up to 66% ETc integrated with brackish water of 2.5 dS m^{-1} proved efficient management strategy to mitigate the negative effects of salinity on the cell wall and maintain a more suitable fiber profile for ruminant nutrition. Therefore, moringa presents itself as a sustainable alternative for agricultural systems in semi-arid environments and a possibility for dietary supplementation for ruminants in regions with water scarcity and limited availability of good-quality water.

Keywords: water stress; forage; salinity; semi-arid; feed supplementation

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I - BALANÇO HÍDRICO E DE SAIS NO SOLO SUBMETIDO A IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA NO CULTIVO DE MORINGA

- Figura 1.** Curva de retenção de água do solo para diferentes profundidades, ajustadas pelo modelo de Van Genuchten. 33
- Figura 2.** Médias mensais dos dados de Temperatura média (Tmed), Evapotranspiração de referência (ETo) e radiação global (Rg) coletados na Estação Meteorológica da UFERSA durante o período experimental. 35
- Figura 3.** Croquis da área experimental com a disposição das parcelas e respectivos tratamentos 36
- Figura 4.** Disposição dos microtubos dentro dos sulcos e próximo ao caule, com diferentes diâmetros de mangueiras e emissores entre plantas para controle da vazão. 37
- Figura 5.** Lâmina de irrigação acumulada durante o experimento, precipitação diária e estimativa da precipitação efetiva acumulada. 39
- Figura 6.** Valores médios da Tensão da água no solo em diferentes períodos em que foram aplicados os tratamentos de irrigação (60 a 210 DAT e 371 a 555 DAT), das estações secas, considerando a média das profundidades 0,15 – 0,35 m..... 42
- Figura 7.** Médias do coeficiente de cultura (Kc) da moringa sob irrigação localizada para diferentes períodos nas estações secas de 2022 e 2023. Transplântio em 15/07/2022..... 43
- Figura 8.** Condutividade elétrica do extrato de saturação do solo no cultivo de moringa em diferentes períodos de avaliação sob diferentes níveis de salinidade (A) e lâminas de irrigação (B)..... 45
- Figura 9.** pH do solo no cultivo de moringa nos períodos de avaliação sob níveis de salinidade (A) e lâminas de irrigação (B). 47
- Figura 10.** Razão da adsorção de sódio (RAS) do solo no cultivo de moringa nos períodos de avaliação sob níveis de salinidade (A) e lâminas de irrigação (B)..... 49

CAPÍTULO II - RESPOSTA BIOMÉTRICA E PRODUTIVA DA MORINGA SUBMETIDA A IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

- Figura 1.** Croquis da área experimental com a disposição das parcelas e respectivos tratamentos..... 59
- Figura 2.** Implantação do sistema de irrigação: demonstração de irrigação localizada por gotejamento após transplântio e antes da aplicação dos tratamentos..... 60
- Figura 3.** Disposição dos microtubos próximo ao caule e dentro dos sulcos, demonstrando diferentes diâmetros e comprimentos de mangueiras calculados de acordo com a vazão de cada planta. 62
- Figura 4.** Formação de sulcos circulares com a finalidade de contenção da água de irrigação na zona radicular das plantas..... 64
- Figura 5.** Temperatura média (T med), Evapotranspiração de referência (ETo), Radiação global (Rg) e Umidade relativa do ar (UR) coletados na Estação Meteorológica da UFERSA durante o

período experimental	64
Figura 6. Lâmina de irrigação e precipitação diária durante o experimento.	65
Figura 7. Altura das plantas de moringa nos períodos de avaliação sob níveis de salinidade da água de irrigação (A) e percentuais das lâminas de irrigação (B).	68
Figura 8. Diâmetro caulinar de moringa nos períodos de avaliação sob níveis de salinidade da água de irrigação (A) e percentuais das lâminas de irrigação (B)	71
Figura 9. Produção de matéria verde/ha de moringa nos períodos de avaliação sob níveis de salinidade da água de irrigação (A) e percentuais de lâminas de irrigação (B)	73
Figura 10. Produção de matéria seca de moringa nos períodos de avaliação sob níveis de salinidade da água de irrigação (A) e lâminas de irrigação (B).	76
Figura 11. Produção de matéria verde (MV) e matéria seca de moringa acumulada durante o período experimental (até 555DAT) sob níveis de salinidade da água de irrigação (A) e diferentes lâminas de irrigação (B).....	78

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I - BALANÇO HÍDRICO E DE SAIS NO SOLO SUBMETIDO A IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA NO CULTIVO DE MORINGA

Tabela 1. Caracterização química quanto a fertilidade e física (granulometria) do solo antes da instalação do experimento.	31
Tabela 2. Composição química das águas de abastecimento e das águas salobras sintéticas.	38
Tabela 3. Período de coleta de solo para avaliação das análises de solo e total de dias de aplicação de tratamentos antes de cada amostragem.....	39
Tabela 4. Tensão média da água no solo no período sem chuvas, nos períodos 60 a 210 DAT e 371 a 555 DAT, considerando as profundidades de 0,15; 0,35 e 0,55 m.....	40
Tabela 5. Resumo da análise de variância para a condutividade elétrica do extrato de saturação CEes considerando a média da camada do solo de 0,0 – 0,4 m no cultivo de moringa nos períodos de avaliação sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal).....	45
Tabela 6. Resultados de análise para a pH considerando a média da camada do solo de 0,0-0,4 m no cultivo de moringa nos períodos de avaliação sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal).	47
Tabela 7. Resultados de análise para a RAS _{es} considerando a média da camada do solo de 0,0-0,4 m no cultivo de moringa nos períodos de avaliação sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal).	48

CAPÍTULO II - RESPOSTA BIOMÉTRICA E PRODUTIVA DA MORINGA SUBMETIDA A IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Tabela 1. Caracterização química quanto a fertilidade do solo antes da instalação do experimento.	58
Tabela 2. Composição química das águas utilizadas na irrigação das moringas em cada tratamento.	63
Tabela 3 Resultados de análise de variância para altura das plantas de moringa nos períodos de avaliação sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação no cultivo da moringa.	67
Tabela 4. Resultados de análise de variância para diâmetro do caule de moringa nos períodos de avaliação sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação no cultivo da moringa	69
Tabela 5. Resumo da análise de variância para massa verde da moringa nos períodos de avaliação sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação no cultivo da moringa.....	72
Tabela 6. Resumo da análise de variância para massa seca da moringa nos períodos de avaliação sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação no cultivo da moringa.....	75

Tabela 7. Resumo da análise de variância para rendimento total da massa fresca e seca (ramos com folhas) de moringa até 555 DAT, em 8 cortes, sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação.....	77
--	----

CAPÍTULO III - POTENCIALIDADE DA MORINGA SUBMETIDA A ESTRESSES ABIÓTICOS: ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL DE FORRAGEM NO SEMIÁRIDO

Tabela 1. Período das podas para avaliação da composição química da forragem e total de dias de aplicação de tratamentos nos períodos secos.....	90
---	----

Tabela 2. Resumo da análise de variância da média para matéria seca (MS) dos períodos avaliados sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação.	92
--	----

Tabela 3. Resumo da análise de variância da média para matéria mineral (MM) dos períodos avaliados sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação.	93
---	----

Tabela 4. Resumo da análise de variância da média para proteína bruta (PB) dos períodos avaliados sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação.	95
--	----

Tabela 5. Resumo da análise de variância da média para extrato etéreo (EE) dos períodos avaliados sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação.	97
--	----

Tabela 6. Resumo da análise de variância da média para carboidratos totais (CHT) dos períodos avaliados sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação.	98
--	----

Tabela 7. Resumo da análise de variância para os períodos avaliados de fibra detergente neutro (FDN), sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação.	99
---	----

Tabela 8. Resumo da análise de variância dos períodos avaliados para fibra detergente ácido (FDA), sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação.	100
--	-----

Tabela 9. Resumo da análise de variância para os períodos avaliados de celulose (CEL), hemicelulose (HEM) e lignina (LDA) sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação.....	101
--	-----

LISTA DE ABREVIACÕES

Al³⁺	Alumínio
AP	Altura de planta
BR	Brasil
Ca²⁺	Cálcio
CAERN	Companhia de Águas e Esgoto do Rio Grande do Norte
CCA	Centro de Ciências Agrárias
CE	Condutividade elétrica
CEL	Celulose
CHT	Carboidratos totais
CTC	Capacidade troca de cátions
DC	Diâmetro do caule
Dr.	Doutor
Dra.	Doutora
EE	Extrato etéreo
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETc	Evapotranspiração da cultura
ETo	Evapotranspiração de referência
FDA	Fibra em detergente ácido
FDN	Fibra em detergente neutro
ha	Hectare
HEM	Hemicelulose
H₂O	Água
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
K⁺	Potássio
Kc	Coeficiente de cultura
LANA	Laboratório de Nutrição Animal
LASAP	Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta
LASAPSA	Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta do Semiárido
LDA	Lignina
Mg²⁺	Magnésio
MM	Matéria mineral
MO	Matéria orgânica

MS	Matéria seca
MV	Matéria verde
N	Nitrogênio
Na⁺	Sódio
PB	Proteína bruta
pH	Potencial hidrogeniônico
PST	Porcentagem de sódio trocável
RAS	Razão Adsorção de sódio
Rg	Radiação global
SB	Soma de bases
Tmed	Temperatura média
RN	Rio Grande do Norte
UERN	Universidade Estadual do Rio Grande do Norte
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
UR	Umidade relativa do ar
V	Porcentagem de saturação por bases

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	18
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	23
CAPÍTULO I - BALANÇO HÍDRICO E DE SAIS NO SOLO SUBMETIDO A IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA NO CULTIVO DE MORINGA	27
1. INTRODUÇÃO.....	29
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4. CONCLUSÕES	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
CAPÍTULO II - RESPOSTA BIOMÉTRICA E PRODUTIVA DA MORINGA SUBMETIDA A IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO	54
1. INTRODUÇÃO:.....	56
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	57
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
4. CONCLUSÃO.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
CAPÍTULO III - POTENCIALIDADE DA MORINGA SUBMETIDA A ESTRESSES ABIÓTICOS: ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL DE FORRAGEM NO SEMIÁRIDO.....	82
1. INTRODUÇÃO.....	84
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	86
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	90
4. CONCLUSÕES	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
CONCLUSÃO GERAL.	109

INTRODUÇÃO GERAL

O semiárido brasileiro consolida-se como um bioma de extrema vulnerabilidade e regime pluviométrico severamente deficitário, apresentando tendência climática progressiva de aridificação e degradação de sua cobertura vegetal. Sua matriz geológica cristalina condiciona sua disponibilidade hídrica predominante de aquíferos cársticos, frequentemente comprometidos pela salinidade e por baixas vazões explotáveis. Este cenário de escassez qualitativa e quantitativa de recursos hídricos restringe drasticamente a irrigação e a produção agropecuária, sendo necessário avaliar a integração do manejo da irrigação deficitária com a tolerância à salinidade que otimize a produtividade e a resiliência de espécies vegetais no cultivo local.

A região caracteriza-se por condições climáticas de precipitação pluvial anual inferior a 800 mm, demanda evaporativa superior a 2000 mm ano⁻¹, déficit hídrico anual $\geq 60\%$, sendo seu principal fator limitante a disponibilidade hídrica durante a maior parte do ano (França, 1977; SUDENE, 2017; SUDENE, 2021). Nesse contexto, Barbosa (2024) fez um estudo relacionado à aridez da região e exibiu uma tendência geral seca em toda região concentrada de 5 a 6 meses secos/ano durante os anos de 1990 a 2022, além da diminuição dos ecossistemas brasileiros entre 2004 e 2022, indicando tendência geral de degradação de cobertura vegetal. Estas condições climáticas, aliada à realidade socioeconômica da região semiárida de extrema pobreza, exigem tecnologias específicas, de baixo custo e simples aplicação, visando o uso e conservação de recursos hídricos disponíveis, de modo a favorecer os processos produtivos, as condições de saúde e qualidade de vida da população (Tinôco *et al.*, 2018).

As fontes hídricas superficiais locais apresentam alta variação de disponibilidade e qualidade de água em função da frequência das chuvas e da alta taxa evaporativa durante o ano, o que torna os aquíferos subterrâneos importantes na distribuição de água para população local e no desenvolvimento das atividades produtivas (Paredes-Trejo *et al.*, 2023). De acordo com os dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (Freddo Filho, 2024), o semiárido brasileiro possui um extenso aquífero de água subterrânea, com aproximadamente 168 mil poços registrados. No entanto, a qualidade da água é água salobra ou salina devido ao acúmulo de sais no solo provenientes das formações geológicas cristalinas subjacentes, resultando em efeitos adversos a organismos vegetais sensíveis, comprometendo seu desenvolvimento e produtividade (Al-Khaza'Leh *et al.*, 2020).

O Estado do Rio Grande do Norte apresenta predominância de águas do tipo mista cloretado e de alto risco de salinização, com padrões acima dos limites recomendados para culturas vegetais, sendo restrita a atividades de irrigação e dessedentação animal (Amaral;

Ferreira; Navoni, 2021). Estes autores avaliaram os impactos nas áreas agropecuárias de subsistências submetidas a utilização de águas salobras no semiárido no Estado e identificaram que apenas 28% dos poços da região apresentaram parâmetros de qualidade de água dentro dos valores de aceitabilidade para agropecuária, sendo 70% destes restritos ao uso de irrigação e 48% à dessedentação de animais.

As áreas irrigadas com má qualidade da água procedente dos poços da região somada à falta de drenagem e manejo incorreto de irrigação proporcionam salinidade no solo e severos danos a produtividade das culturas (Oliveira *et al.*, 2021). O uso de água salobra/salina, poluída ou com excesso de nutrientes na irrigação reduz significativamente a produtividade das culturas e pode causar degradação do solo, sendo necessário adequar técnicas de manejo e escolhas de espécies tolerantes a fim de mitigar esses efeitos negativos (Araújo *et al.*, 2024).

Fisiologicamente, a presença de sais na água de irrigação reduz o potencial osmótico, exigem maior gasto energético radicular e, em condições extremas, levam à toxidez e morte vegetal. Diante desse cenário, pesquisas conduzidas em regiões semiáridas concentram-se em quantificar limiares de salinidade para diferentes culturas e em desenvolver estratégias de manejo sustentável com risco mínimo de salinização ou sodificação de solos irrigados com águas salobras (Gelu; Komai, 2025; Gul *et al.*, 2022; Guo *et al.*, 2023; Hanin *et al.*, 2016; Jiang *et al.*, 2025).

Nesse contexto, Acosta-Motos Jr. *et al.* (2017) avaliaram o estresse salino nos parâmetros de crescimento em diversas espécies e concluíram que o excesso de sódio trocável no solo prejudica o crescimento e a respiração celular, a expansão radicular, além da captação de água e fixação de CO₂ pela planta. Azza Mazzer *et al.* (2007) evidenciaram inibição direta de crescimento devido uma redução na taxa de fotossínteses e excessiva absorção de sais pelo tecido vegetal, quando irrigada com água salina. Outros autores demonstram que a aplicação de lâminas de irrigação reduzida pode influenciar no crescimento vegetativo, mesmo nas espécies adaptadas a condições de baixa disponibilidade hídrica e elevada tolerância à salinidade (Ashraf ; Harris, 2004; Hussain *et al.*, 2009; Colla *et al.*, 2010).

A *moringa oleifera* LAM (moringa) é uma planta originária dos Himalaias, que se adapta a condições climáticas diversas, em diferentes tipos de solos e possui baixo custo de produção. Desde a antiguidade, a moringa é cultivada pelos povos orientais com o intuito de combater a desnutrição, conservar alimentos e curar doenças, devido às suas propriedades nutricionais e farmacológicas. Na Índia antiga, os extratos de suas folhas eram servidos na alimentação de guerreiros, acreditando-se que acrescentava força e resistência durante as batalhas (Jesus *et al.*, 2013). Dentre suas potencialidades, destacam-se o uso no tratamento de água, na medicina

terapêutica, alimentação animal, alimentação humana e nas indústrias farmacêutica e de cosmético (Friguetto, 2007; Nadeem; Imran, 2016; Olson; Fahey, 2011, Oliveira *et al.*, 2019).

Do ponto de vista social, vários trabalhos científicos avaliaram potencialidades da moringa em regiões com escassez de água, visando ressaltar a importância de avaliar o uso de água salina na irrigação e a tolerância das culturas de modo a suprir a demanda hídrica em regiões áridas e semiáridas, alguns deles demonstrando redução de crescimento e desenvolvimento a partir de salinidade de 2 dS m⁻¹ (Daba, 2016; Devkota; Bhusal, 2020; Gharsallah *et al.*, 2023; Nunes *et al.*, 2016; Oliveira *et al.*, 2019; Saucedo-Pompa *et al.*, 2018). Pesquisas avaliaram sua adaptabilidade no semiárido brasileiro e evidenciaram sua capacidade de sobrevivência e produção em zonas de baixa umidade do solo, tolerância a elevadas temperaturas, alta taxa de evaporação e variações de precipitação pluvial, além de apresentar desempenho superior a outras culturas sob estresse salino (Almeida *et al.*, 2010; Oliveira, *et al.*, 2019; Souza *et al.*, 2020).

Oliveira Junior *et al.* (2021) avaliaram os efeitos de lâminas de irrigação no crescimento vegetativo de mudas de moringa, e verificaram redução na altura e no diâmetro do caule das plantas a partir de restrição hídrica proporcionada pela aplicação de 50% da ET_c. Por outro lado, Santos *et al.* (2017) obtiveram o K_c da moringa, pelo Método de Penman-Monteith, utilizando medições por lisímetros de drenagem, para as fases fenológicas I, II e III, respectivamente, 0,75; 1,75; 1,73. No mesmo trabalho, os valores calculados de ET_c acumulados pela cultura foram de 134,8 mm para os lisímetros de drenagem durante os meses de fevereiro a maio de 2015.

El-Ghamal; Khamis (2021) cultivaram mudas de moringa em condições semiáridas e irrigação deficitária, obtendo crescimento vegetativo e produção de biomassa superiores nas plantas submetidas a déficit hídrico de 25% da capacidade de campo em relação àquelas reduzidas com 50% ou 100% de restrição hídrica. El-Borahie *et al.* (2021) observaram perda produtiva da moringa nos tratamentos de restrição hídrica a partir de 40%. Esses estudos demonstram possibilidade de irrigação com frações da ET_c ajustadas, reduzindo o consumo de água sem comprometer significativamente o crescimento e a produtividade da moringa, e evitando a lixiviação excessiva de nutrientes e a salinização do solo, o que torna o cultivo mais sustentável em áreas com restrição hídrica ou solos degradados (Melo *et al.*, 2023).

Com relação a salinidade, Azeem *et al.* (2023) investigaram as modulações induzidas pelo sal no crescimento da moringa até a salinidade de 100 mM de NaCl, e verificaram redução significativa do crescimento vegetativo nesta salinidade, contudo ocorreu o aumento de todas as enzimas antioxidantes, incluindo ácido ascórbico, glutathione, fenóis totais e flavonoides, com alta capacidade de eliminação de radicais livres e poder redutor, o que pode elevar valor medicinal

em folhas e sementes. Bashir *et al.* (2021) mostraram que o estresse salino inibiu significativamente a taxa de transporte de elétrons e a taxa fotossintética em plantas submetidas a partir de 200 mM de NaCl, acarretando redução de crescimento.

Abbas (2023) utilizou o cloreto de cálcio (CaCl_2) para mitigar o impacto adverso do estresse oxidativo induzido pelo NaCl em termos de parâmetros de crescimento, clorofila, melhorando o estabelecimento e o crescimento de plântulas de moringa cultivadas sob condições de estresse salino. Boumenjel *et al.* (2021), evidenciaram uma adaptação fisiológica à salinidade concentrada de 50 mM de NaCl a longo prazo devido ao acúmulo de solutos orgânicos (prolina e açúcares solúveis), o que melhorou significativamente os pigmentos fotossintéticos.

Pesquisas recentes destacam a moringa como forrageira de elevado valor nutritivo, apresentando proteína bruta (PB) entre 25–28% nas folhas, rica em vitaminas (como a C), minerais (ferro), carotenoides e flavonoides (quercetina, kaempferol), com reconhecidos efeitos antioxidantes e imunomoduladores e por um perfil de aminoácidos essenciais que excede as recomendações da FAO para ruminantes e monogástricos (Rizwan; Rizwan; Banday, 2022; Simbaya; Chibinga; Salem, 2020; Valdivié-Navarro *et al.*, 2020). Penãlver *et al.* (2022) revelaram um alto teor de proteínas ($\text{PB}_{\text{média}} = 26,7\%$) e baixo teor de lipídios ($\text{EE}_{\text{média}} = 6,18\%$) na composição química da folha da moringa, além de importante fonte de cálcio (Ca), ferro (Fe), cobre (Cu) e potássio (K), apresentando alta biodisponibilidade desses minerais. Contudo, quando avalia-se a forragem integral (folhas e caules) apresenta teores elevados de fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA) e lignina, o que reduz sua energia metabolizável, especialmente para aves e suínos, o que sugere adequação do nível de inclusão adequado para maximizar seu potencial na alimentação animal (Abd El-Hack *et al.*, 2022).

Diante dos níveis nutricionais apresentados, a moringa apresenta-se como fonte de proteína sustentável com potencial para utilização na alimentação animal em substituição de culturas convencionais (farelo de soja ou farelo de trigo), garantindo o desenvolvimento sustentável da pecuária no semiárido com uma espécie de alto valor biológico proteico. Neste contexto, esta pesquisa abrange abordagens complementares a partir da aplicação controlada de lâminas de irrigação deficitárias até 33%ETc associada a incremento de salinidade até 4,5dS m^{-1} : um estudo experimental do comportamento do solo, através da determinação do coeficiente de cultura, do monitoramento da tensão da água e da dinâmica de sais no solo e um estudo de definição de níveis tolerantes da salinidade limiar e adequação das lâminas de irrigação para manter o desenvolvimento dos tecidos e produção de biomassa da moringa em relação a mesma espécie cultivada sem irrigação, com foco na sua utilização estratégica como fonte de proteína e outros

nutrientes na suplementação alimentar animal na região, destacando seu potencial agrícola sustentável e de segurança alimentar em ambientes com restrições hídricas e salinas.

Portanto, objetivou-se avaliar os efeitos dos níveis de salinidade da água até $4,5 \text{ dS m}^{-1}$ e déficit de irrigação até $33\%ET_c$ na dinâmica de acúmulo de sais no solo, no desenvolvimento vegetativo, na produção quantitativa e qualitativa de biomassa da moringa, bem como seu potencial forrageiro para alimentação animal no semiárido brasileiro.

REFERÊNCIAS

- ABD EL-HACK, M. E. *et al.* Pharmacological, nutritional and antimicrobial uses of *Moringa oleifera* Lam. leaves in poultry nutrition: an updated knowledge. **Poultry Science**, [s. l.], v. 101, n. 9, p. 102031, 2022.
- ACOSTA-MOTOS, J.; ORTUÑO, M.; BERNAL-VICENTE, A.; DIAZ-VIVANCOS, P.; SANCHEZ-BLANCO, M.; HERNANDEZ, J. Plant Responses to Salt Stress: Adaptive Mechanisms. **Agronomy**, v. 7, n. 1, p. 18, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy7010018>
- AL-KHAZA'LEH, J. *et al.* Assessment of water source availability and quality for small ruminant consumption in the Northern Badia region of Jordan. **Veterinary World**, [s. l.], v. 13, n. 6, p. 1073–1082, 2020.
- AMARAL, K.; FERREIRA, D. M.; NAVONI, J. A. Avaliação das águas subterrâneas salobras do semiárido do Rio Grande do Norte: Qualidade e impactos sob atividades agropecuárias de subsistência. **Águas Subterrâneas**, v. 35, n. 3, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/ras.v35i3.30077>. Acesso em: 4 abr. 2025.
- ARAÚJO, A. S. F.; MEDEIROS, É. V. de; COSTA, D. P. da; PEREIRA, A. P. de A.; MENDES, L. W. From desertification to restoration in the Brazilian semiarid region: Unveiling the potential of land restoration on soil microbial properties - ScienceDirect. **Journal of Environmental Management**, v. 351, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119746>. Acesso em: 26 maio. 2025.
- ASHRAF, M.; HARRIS, J.C. Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants. **Plant Science**, v. 166, n. 1, p. 3-16, 2004.
- AZZA MAZHER, A.M.; FATMA EL-QUESNI, E.M.; FARAHAT, M.M. Responses of ornamental plants and woody trees to salinity. *World Journal Agriculture Science*, 2007.
- BRASIL. SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS. Brasília, 2018. Disponível em: Acesso em: 02 de fevereiro de 2022
- BARBOSA, H. A. Understanding the rapid increase in drought stress and its connections with climate desertification since the early 1990s over the Brazilian semi-arid region. **Journal of Arid Environments**, v. 222, p. 105142, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2024.105142>
- COLLA, G.; ROUPHAEL, Y.; LEONARDI, C.; BIE, Z. Role of grafting in vegetable crops grown under saline conditions. *Scientia horticulturae*, v. 127, n. 2, p. 147-155, 2010.
- DABA, M. Miracle Tree: A Review on Multi-purposes of *Moringa oleifera* and Its Implication for Climate Change Mitigation. **Journal of Earth Science & Climatic Change**, v. 7, n. 8, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000366>. Acesso em: 20 maio. 2025.
- DEVKOTA, S.; BHUSAL, K. K. *Moringa oleifera* : A miracle multipurpose tree for agroforestry and climate change mitigation from the Himalayas – A review. **Cogent Food & Agriculture**, v. 6, n. 1, p. 1805951, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/23311932.2020.1805951>
- EL-BORAIE, F. M.; EL SHAFAY, R. M. M.; ELHAGAREY, M. E. Morphological and chemical characterizes responses of *moringa oleifera* yield to localized irrigation systems, water restriction and fertilizers. **International Journal of Advanced Research**, [s. l.], v. 9, n. 02, p. 509–523, 2021.
- EL-GAMAL, A.; KHAMIS, M. H. Impact of organic matter on the growth of *jatropha curcas* and *moringa oleifera* seedlings beneath water deficit. **Scientific Journal of Flowers and Ornamental Plants**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 427–446, 2021.

FRANÇA, F. M. C.. Documento referencial do polo de desenvolvimento integrado Petrolina-Juazeiro. Banco do Nordeste do Brasil (BNB). 1997.

FREDDO FILHO, F.; JOSÉ, V. BRASIL. **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS**, 2024. Disponível em: <http://rigeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/24628>. Acesso em: 21 ago. 2025.

FRIGHETTO, R.S.; FRIGUETO, N.; SCHENEIDER, R.P.; LIMA, P.C.L. O potencial da espécie *Moringa oleífera* (moringaceae). **Revista Fitos**, v. 2, n. 2, 2007.

GHARSALLAH, K.; REZIG, L.; RAJOKA, M. S. R.; MEHWISH, H. M.; ALI, M. A.; CHEW, S. C. *Moringa oleifera*: Processing, phytochemical composition, and industrial applications. **South African Journal of Botany**, v. 160, p. 180–193, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.07.008>

GELU, G.; KOMAI, K. Spatial Distributions of Salinity and Sodicity in Semiarid Irrigated Lands in Ethiopia for Effective Salt-Affected Soil Management. **Irrigation and Drainage**, [s. l.], v. 74, n. 4, p. 1730–1741, 2025.

GUL, Z. *et al.* An Insight into Abiotic Stress and Influx Tolerance Mechanisms in Plants to Cope in Saline Environments. **Biology**, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 597, 2022.

GUO, L. *et al.* Research Progress of High-Salinity Wastewater Treatment Technology. **Water**, [s. l.], v. 15, n. 4, p. 684, 2023.

HANIN, M. *et al.* New Insights on Plant Salt Tolerance Mechanisms and Their Potential Use for Breeding. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 7, 2016. Disponível em: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2016.01787/full>. Acesso em: 12 jan. 2026.

HUSSAIN, K.; MAJEED, A.; NAWAZ, K.; KHIZAR, H.B.; NISAR, M.F. Effect of different levels of salinity on growth and ion contents of black seeds (*Nigella sativa* L.). Curr. **Research Journal of Biological Sciences**. 2009.

JESUS, A. R.; MARQUES, N. S.; SALVI, E.J.N.R.; TUYUTY, P.L.M.; PEREIRA, S.A. **Cultivo da Moringa oleífera**. Instituto Euvaldo Lodi – IEL/BA. 2013.

JIANG, Y. *et al.* Effect of Alternate Sprinkler Irrigation with Saline and Fresh Water on Soil Water–Salt Transport and Corn Growth. **Agronomy**, [s. l.], v. 15, n. 8, p. 1854, 2025.

MELO, A. R. D. *et al.* Alterações químicas do solo após irrigação com efluentes e adubação fosfatada cultivado com *Moringa oleífera* Lam. **Ciência Florestal**, [s. l.], v. 33, n. 3, p. e70786, 2023.

NADEEM, M., IMRAN, M. Promising features of *Moringa oleifera* oil: recent updates and perspectives. **Lipids in Health and Disease**, v. 15, n. 212, 2016. <https://doi.org/10.1186/s12944-016-0379-0>

NUNES, A. T.; CABRAL, D. L. V.; AMORIM, E. L. C.; SANTOS, M. V. F. D.; ALBUQUERQUE, U. P. Plants used to feed ruminants in semi-arid Brazil: A study of nutritional composition guided by local ecological knowledge. **Journal of Arid Environments**, v. 135, p. 96–103, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.08.015>

OLIVEIRA, M. L. de; SANTOS, C. A. C. dos; DE OLIVEIRA, G. de; PEREZ-MARIN, A. M.; SANTOS, C. A. G. Effects of human-induced land degradation on water and carbon fluxes in two different Brazilian dryland soil covers. **Science of The Total Environment**, v. 792, p. 148458, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148458>

OLIVEIRA JUNIOR, V. M. D.; LOPES, T. S.; PEREIRA FILHO, J. V.; BARBOSA, J. R.; SOARES, R. W. F.; PEREIRA, C. C. M. D. S. Crescimento vegetativo da moringa em distintos regimes de irrigação

associados a composições de diferentes substratos. **IRRIGA**, v. 1, n. 4, p. 646–652, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.15809/irriga.2021v1n4p646-652>

OLIVEIRA, P. R.; GOMES, D. J.; CAETANO, B. R. F.; SILVA, F. R. A. D.; PEDROZA, A. P.; CARVALHO, E. K. M. D. A. Possibilidades de uso da Moringa oleífera numa perspectiva farmacológica, cosmética e alimentícia. **Revista de Agroecologia no Semiárido**, v. 3, n. 2, p. 27, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.35512/ras.v3i2.3416>

OLSON, M.E.; FAHEY, J.W.. Moringa oleifera: un árbol multiusos para las zonas tropicales secas. **Revista México Biodiversidade**, v. 82, n. 4, p. 1071-1082, 2011. ISSN 2007-8706

PAREDES-TREJO, F.; BARBOSA, H. A.; DALDEGAN, G. A.; TEICH, I.; GARCÍA, C. L.; KUMAR, T. V. L.; BURITI, C. D. O. Impact of Drought on Land Productivity and Degradation in the Brazilian Semiarid Region. **Land**, v. 12, n. 5, p. 954, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land12050954>

PEÑALVER, R. *et al.* Nutritional and Antioxidant Properties of Moringa oleifera Leaves in Functional Foods. **Foods**, [s. l.], v. 11, n. 8, p. 1107, 2022.

RANGEL, S.R. Moringa Oleífera: um purificador natural de água e complemento alimentar para o nordeste do Brasil. 2010. Acesso em: 12/05/2016.

RIZWAN, N.; RIZWAN, D.; BANDAY, M. T. Moringa oleifera: The Miracle Tree and its Potential as Non-conventional Animal Feed: A Review. **Agricultural Reviews**, [s. l.], n. Of, 2022. Disponível em: <https://arccjournals.com/journal/agricultural-reviews/R-2405>. Acesso em: 19 dez. 2025.

RODRIGUES, V. S. Manejo da irrigação com água salina na cultura do milho no Maciço de Baturité-Ce. 2019.

SANTOS, A.F.S.; LUZ, L.A.; ARGOLO, A.C.C.; TEIXEIRA, J.A.; PAIVA, P.M.G.; COELHO, L.C.B.B. Isolation of a seed coagulant Moringa oleifera lectin. **Process biochemistry**, v. 44, n. 4, p. 504-508, 2009. doi:10.1016/j.procbio.2009.01.002

SANTOS, C. S. dos; MONTENEGRO, A. A. de A.; SANTOS, M. A. L. dos; PEDROSA, E. M. R. Evapotranspiration and crop coefficients of Moringa oleifera under semi-arid conditions in Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 12, p. 840–845, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n12p840-845>

SAUCEDO-POMPA, S.; TORRES-CASTILLO, J. A.; CASTRO-LÓPEZ, C.; ROJAS, R.; SÁNCHEZ-ALEJO, E. J.; NGANGYO-HEYA, M.; MARTÍNEZ-ÁVILA, G. C. G. Moringa plants: Bioactive compounds and promising applications in food products. **Food Research International**, v. 111, p. 438–450, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.05.062>

SIMBAYA, J.; CHIBINGA, O.; SALEM, A. Nutritional evaluation of selected fodder trees: Mulberry (*Morus alba* Lam.), Leucaena (*Leucaena leucocephala* Lam de Wit.) and Moringa (*Moringa oleifera* Lam.) as dry season protein supplements for grazing animals. **Agroforestry Systems**, [s. l.], v. 94, p. 1189–1197, 2020.

SUDENE–SUPERINTENDÊNCIA, DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE. **Delimitação do semiárido**. Recife: Sudene, 2017.

SUDENE. Delimitação do semiárido - 2021 relatório final. **Superintendente do desenvolvimento do nordeste**, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/sudene/pt-br/centrais-de-conteudo/02semiariadorelatorionv.pdf>.

TINÔCO, I. C. M.; BEZERRA, B. G.; LUCIO, P. S.; BARBOSA, L. M. Characterization of Rainfall Patterns in the Semiarid Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 41, n. 2, p. 397–409, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.11137/2018_2_397_409

VALDIVIÉ-NAVARRO, M. *et al.* Review of Moringa oleifera as forage meal (leaves plus stems) intended for the feeding of non-ruminant animals. **Animal Feed Science and Technology**, [s. l.], v. 260, 2020.

CAPÍTULO I

BALANÇO HÍDRICO E DE SAIS NO SOLO SUBMETIDO A IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA NO CULTIVO DE MORINGA

RESUMO: O manejo de irrigação é fundamental para monitorar a salinidade da água e minimizar os impactos nas propriedades químicas do solo. Objetivou-se quantificar a umidade do solo, o coeficiente da cultura (K_c) nas fases do desenvolvimento, e avaliar a dinâmica dos sais (CE_s , RAS e pH) no solo submetido a irrigação deficitária a partir de 33% ET_c com água de salinidade moderada até 4,5 $dS\ m^{-1}$ em condições semiáridas do Nordeste do Brasil. Utilizou-se uma área experimental em campo, situada no Campus Leste da Universidade Federal do Semi-Árido, Mossoró-RN-Brasil. Adotou-se delineamento experimental de quatro blocos casualizados em esquema fatorial $3 \times 3 + 1$, com interação estratégica de irrigação controlada por tensiômetro em relação a evapotranspiração ($L_1=33\%$; $L_2=66\%$; $L_3=100\%ET_c$) e três níveis de salinidade da água de irrigação ($S_1=0,5$; $S_2=2,5$; $S_3=4,5\ dS\ m^{-1}$), além de um tratamento sem irrigação após 60 DAT. Os dados foram submetidos à análise de variância e testes de Tukey e de Dunnet ($p \leq 0,05$). Os valores de umidade do solo expressos pela tensão da água no solo detectaram estresse hídrico na zona radicular de L_1 . A irrigação controlada reduziu substancialmente a ET_c da cultura, obtendo-se K_c inferior a 0,5 até o segundo ano de cultivo. O monitoramento da salinidade do solo foi realizado a cada seis meses para as profundidades 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m, evidenciando que L_1 minimizou a deposição de sais no solo e L_3 proporcionou lixiviação da água aplicada, sendo L_2 o tratamento com maior acúmulo de sais no solo. A alternância do período chuvoso com os secos e o método de irrigação por microtubos favoreceram a estabilidade do pH .

Palavras-chave: coeficiente de evapotranspiração, estresses abióticos, fertilidade, semiárido

CHAPTER I

WATER AND SALT BALANCE IN SOIL UNDER DEFICIT IRRIGATION IN MORINGA CULTIVATION

ABSTRACT: Irrigation management is crucial for monitoring water salinity and mitigating impacts on soil chemical properties. This study aimed to quantify soil water tension levels, the crop coefficient (K_c) at different development stages, and evaluate the dynamics of soil salts (EC_e , SAR, and pH) under deficit irrigation initiated at 33% ET_c using moderately saline water up to 4.5 dS m^{-1} in the semi-arid conditions of Northeast Brazil. A field experimental area located at the East Campus of the Federal University of Semi-Arid Region, Mossoró-RN-Brazil, was utilized. The experimental design consisted of four randomized blocks in a $3 \times 3 + 1$ factorial arrangement, with strategic interaction of irrigation controlled by tensiometers relative to evapotranspiration ($L1=33\%$; $L2=66\%$; $L3=100\%ET_c$) and three levels of irrigation water salinity ($S1=0.5$; $S2=2.5$; $S3=4.5$ dS m^{-1}), in addition to one treatment without irrigation after 60 DAT. Data were subjected to analysis of variance and Tukey and Dunnet tests ($p \leq 0.05$). Soil water tension values indicated water stress in the root zone of L1. Controlled irrigation substantially reduced crop ET_c , resulting in a K_c below 0.5 until the second year of cultivation. Soil salinity monitoring was conducted every six months for depths of 0.0–0.2 and 0.2–0.4 m, revealing that L1 minimized salt deposition in the soil, L3 promoted leaching of applied water, and L2 was the treatment with the greatest salt accumulation. The alternation of rainy and dry periods, combined with the microtube irrigation method, favored pH stability.

Keywords: evapotranspiration coefficient, abiotic stresses, fertility, semi-arid

Highlights

- A irrigação da moringa até 4,5 dS m⁻¹ é uma alternativa viável no semiárido brasileiro.
- O período de precipitação foi suficiente para equilibrar a concentração de sais no solo.
- O manejo de irrigação manteve níveis estáveis de pH do solo entre os tratamentos

1. INTRODUÇÃO

A limitação de recursos hídricos em regiões semiáridas impõe a necessidade de estratégias de manejo capazes de conciliar a produtividade agrícola e a conservação do solo. Estudos avaliando os efeitos das ações antrópicas ao longo dos séculos na região evidenciaram acelerada taxa de erosão do solo e impactos negativos nos fluxos evaporativos, principalmente nas áreas mais áridas com excessiva exposição solar (Araújo *et al.*, 2024; Oliveira Junior *et al.*, 2021). Nesse contexto, pesquisas referentes ao planejamento, gestão e uso racional dos recursos hídricos disponíveis na região tornam-se fundamentais para a sustentabilidade do ecossistema local, incluindo medições de dados climatológicos, estimativa de disponibilidade hídrica da cultura, usos múltiplos da água e manejo de irrigação (Nunes *et al.*, 2022; Raulino; Silveira; Lima Neto, 2021; Santos *et al.*, 2017).

Diante desse cenário, aperfeiçoar a irrigação na região promove benefícios socioeconômicos e ambientais à população através do aumento da produtividade agrícola e da utilização racional dos recursos hídricos disponíveis, sendo muitas vezes necessária a utilização de águas de reúso ou de alta concentração salina para manutenção das áreas irrigadas (Amaral; Navoni, 2023; Costa *et al.*, 2024; Marangon *et al.*, 2020). Irrigar com água salobra pode manter a umidade do solo enquanto economiza recursos de água doce, entretanto o acúmulo de sais gera impactos negativos no crescimento das plantas em função do efeito osmótico e toxicidade dos íons, sendo um dos principais problemas enfrentados pela agricultura irrigada no semiárido (Tavares Filho *et al.*, 2020).

A *moringa oleífera* LAM (moringa) demonstra resiliência à salinidade moderada, a partir de adaptações fisiológicas para mitigar a inibição severa do crescimento e o aumento do estresse oxidativo causado por níveis excessivos de sais na sua zona radicular (Azeem *et al.*, 2023; Boumenjel; Papadopoulos; Ammari, 2021; Fatima *et al.*, 2018). Seu cultivo no semiárido limita a lixiviação natural, devido à baixa pluviosidade e alta evaporação, entretanto favorece a concentração de sais na zona radicular da planta, sendo necessária estratégias de manejo eficazes em áreas propensas à salinidade. O monitoramento contínuo do extrato de saturação do solo e do manejo hídrico também contribuem para evitar perdas produtivas e desertificação a longo prazo (Melo *et al.*, 2025; Vijayaragavan *et al.*, 2025). Devkota e Bhusal (2020) destacaram que a moringa desempenha um papel vital na conservação do solo e da água, destacando seu efeito de sombra e na qualidade do solo cultivado, denominando-a “árvore ideal” para a agrofloreza.

O panorama descrito revela a necessidade de estudos relacionados à definição de níveis tolerantes da salinidade limiar e adequação das lâminas de irrigação desta planta para manter a qualidade do solo e controlar as possíveis alterações dos parâmetros hídricos solo irrigado em condições semiáridas. Portanto, objetivou-se quantificar os níveis de tensão do solo, o coeficiente da cultura (Kc) nas fases do desenvolvimento, e avaliar a dinâmica dos sais (CEes, RAS e pH) no solo submetido a irrigação deficitária a partir de 33%ETc com água de salinidade moderada até 4,5dS m⁻¹ em condições semiáridas do Nordeste do Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido entre julho de 2022 a março de 2024, em área experimental situada no campus Leste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), município de Mossoró, estado do Rio Grande do Norte (RN), Brasil (5°12'48'' S, 37°18'44'' W e altitude de 37 m). O clima semiárido foi classificado como BSw^h de acordo com Köppen, isto é, clima muito

quente e chuvas escassas e irregulares, precipitação pluvial média anual de 685,3 mm e uma média anual de temperatura do ar de 27°C (Alvares *et al.*, 2013).

Antes do início da experimentação em campo, realizaram-se coletas de amostras simples deformadas de solo com auxílio de trado, tipo holandês, (EQUILAB, Uberaba, MG, Brasil), nas profundidades de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m, homogeneizadas e transformadas em amostras composta representativa da área, analisadas físicas e quimicamente no Laboratório de Análises de Solo, Água e Planta do Semiárido (LASAPSA). De acordo com a Tabela 1, a textura do solo apresentou-se franco-arenosa. As análises de fertilidade classificaram-no como ligeiramente alcalino (pH=7,6), fertilidade moderada, relação Ca:Mg adequada para maioria das culturas, além de não sódico e não salino até a profundidade de 0,4 m (Richards, 1969). O solo foi classificado como Plintossolo Argilúvico pelo Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (Santos *et al.*, 2018) que equivale a Ultisols, conforme critério de avaliação da Soil Taxonomy (Soil Taxonomy, 2022).

Tabela 1. Caracterização química quanto a fertilidade e física (granulometria) do solo antes da instalação do experimento

Química		Profundidades (m)		Física		Profundidades (m)	
Fertilidade	Unidade	0,0-0,2	0,2-0,4	Granulometria (dag kg ⁻¹)		0,0-0,2(m)	0,2-0,4 (m)
pH (H ₂ O)		7,62	7,66	Areia grossa		0,54	0,47
CE	dS m ⁻¹	0,19	0,18	Areia fina		0,24	0,24
K ⁺	cmol _c L ⁻¹	0,37	0,38	Areia Total		0,78	0,71
Ca ²⁺ + Mg ²⁺	cmol _c L ⁻¹	1,91	1,97				
Na ⁺	cmol _c L ⁻¹	0,35	0,37	Silte		0,13	0,13
Al ³⁺	cmol _c L ⁻¹	0	0	Argila		0,09	0,17
Al ³⁺ + H ⁺	cmol _c L ⁻¹	0	0				
SB	cmol _c L ⁻¹	2,63	2,72				
CTC	cmol _c L ⁻¹	2,63	2,72				
V	%	100	100				

pH = Potencial Hidrogênico – medidor de pH Marca Tecnal Modelo Tec-2 – Piracicaba-SP-Brasil; CE = Condutividade elétrica - condutivímetro de bancada digital CD-820 – Instrutherm São Paulo-SP-Brasil; K⁺ = potássio- Fotômetro de chama digital – Marca Werberlab – SC/PR, Brasil; Ca²⁺= Cálcio – Teixeira *et al.*, 2017; Mg²⁺= Magnésio; Na⁺ = sódio Fotômetro de chama digital – Marca Werberlab – SC/PR, Brasil; Al³⁺ = Alumínio; Al³⁺ + H⁺ = Acidez do solo.

No mesmo período, realizou-se coleta do solo nas profundidades de 0,0 – 0,2 m, 0,2 – 0,4 m e 0,4 – 0,6 m, para determinação da curva de retenção da água no solo. Primeiramente, para as tensões até 6 kPa, utilizaram-se as amostras de solo indeformadas coletadas em anéis volumétricos

em mesa de areia, para tensões de 10; 30 e 50 kPa, utilizou-se mesa de tensão, e para tensões de 100, 300 e 1500 kPa, utilizou o método de extrator de Richards, conforme a metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017).

Desta forma, determinaram-se as curvas de retenção do solo (Figura 1), ajustando-se os dados através do modelo de Van Genuchten (1980) – Eq. 1, onde a umidade da capacidade de campo nas profundidades 0-0,2; 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m apresentaram, respectivamente, os valores de 0,225; 0,234; 0,236 m³ m⁻³, correspondendo às tensões de 2,2; 1,9 e 2,3 kPa. A umidade para o ponto de murcha permanente apresentou valores de 0,031; 0,084 e 0,093 m³ m⁻³, respectivamente. Considerando-se o fator de água prontamente disponível, a tensão crítica da água no solo foi de 12,5; 10,6 e 18,2 kPa, mesmo fator utilizado por Santos *et al.* (2017) para a cultura da moringa:

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

Onde:

θ : Conteúdo de água volumétrico em função da tensão, h (cm³/cm³)

θ_s : Conteúdo de água no solo saturado

θ_r : Conteúdo de água residual

Ψ_m : Potencial matricial

α , n, m: Parâmetros empíricos do solo

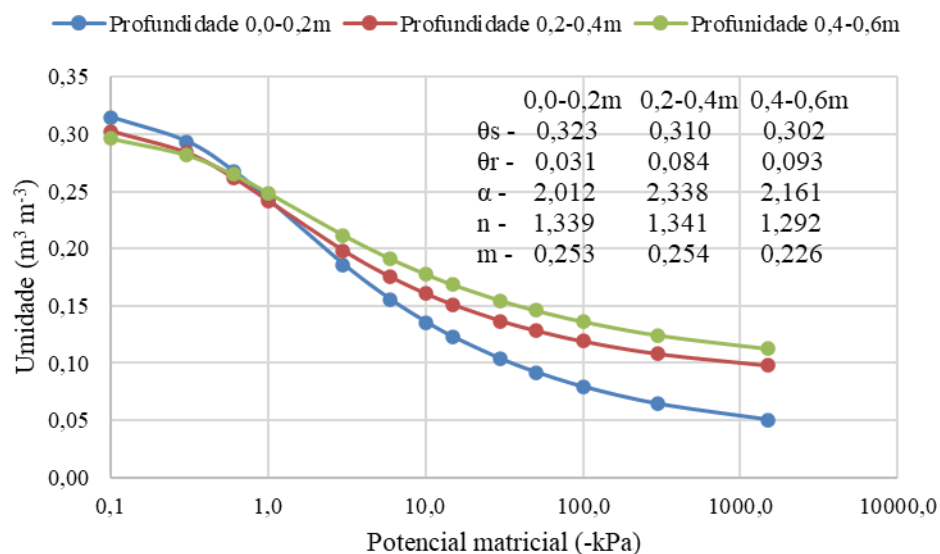


Figura 1. Curva de retenção de água do solo para diferentes profundidades, ajustadas pelo modelo de Van Genuchten

A partir dos dados obtidos, considerou-se a umidade estimada pelo potencial matricial medido em parcelas do tratamento de irrigação plena – S1L3 (S1 - 0,5 dS.m⁻¹; L3 -100%ET_c) nas profundidades de 0,15; 0,35 e 0,55 m, entre os potenciais matriciais de -6 e -20 kPa, estimando o volume de água a aplicar em até 20 L, considerando o volume de aplicação de lâmina líquida de água na zona radicular da cultura, para a camada 0-0,5 m, e assumido um fator de molhamento de 0,30.

O monitoramento da necessidade hídrica foi realizado pela leitura dos potenciais matriciais, a partir de seis tensiômetros instalados em duas plantas úteis nas profundidades de 0,15; 0,35 e 0,55 m da parcela da lâmina de irrigação plena (Figura 2), utilizados como referência para determinação o turno de rega a partir do volume de água condizente com a capacidade de armazenamento de água na área molhada por planta, o que resultou em frequência de irrigação de três irrigações por semana e com duração máxima de 13 minutos cada.

Dessa forma, calculou-se o balanço hídrico para máxima disponibilidade de água para cultura em condição ideal irrigada com água de menor teor salino (0,5 dS m⁻¹), considerando a média por períodos, que correspondeu a quantidade de água aplicada pela irrigação no tratamento multiplicado pela eficiência da irrigação medida (0,9), conforme equação determinada por

Reichards e Timm (2022) - Eq. 2, que dividido pela evapotranspiração de referência (ET_o) determinou o coeficiente de cultura (K_c), desprezando o fluxo de água abaixo do sistema radicular acima de 10% da fração de lixiviação, considerando que a lâmina de irrigação foi calculada para repor a água do solo para a capacidade de campo, e também devido ao solo na camada abaixo do sistema radicular ter um grande gradiente textural em relação a camada mais superficial, apresentando baixa condutividade hidráulica.

$$k_c = \frac{\text{Irrigação} \times \text{Eficiência}}{ET_o} \quad \text{Eq. 2}$$

Em que:

K_c = Coeficiente da cultura;

Irrigação = Lâmina de irrigação (mm/dia);

Eficiência = Fator para gotejamento avaliado em campo (0,9) e

ET_o = Evapotranspiração de referência (mm/dia).

Durante o experimento, registrou-se diariamente os dados meteorológicos referentes à temperatura média do ar (T_{med}), a evapotranspiração de referência (ET_o), a radiação global (R_g) e a umidade relativa do ar (UR), por meio da estação meteorológica da UFERSA, conforme ilustrado na Figura 2.

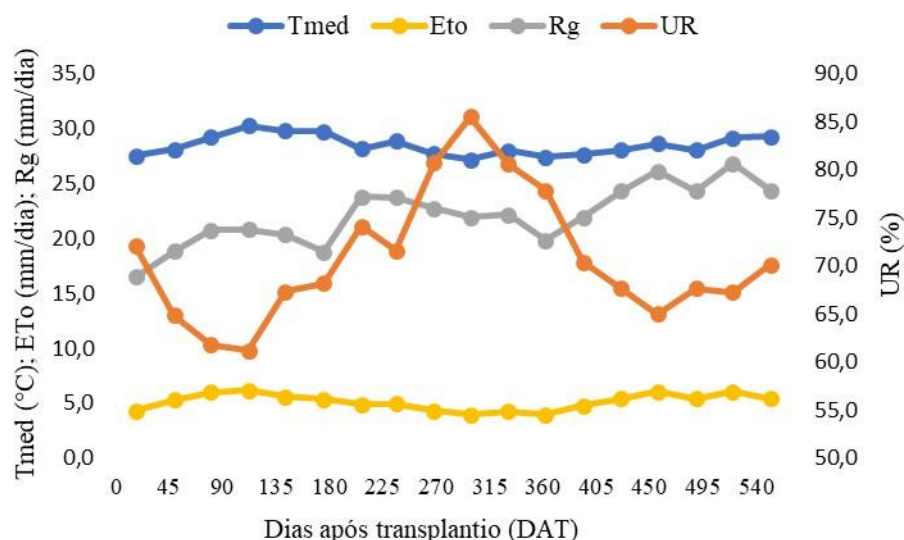


Figura 2. Médias mensais dos dados de Temperatura média (Tmed), Evapotranspiração de referência (ETo), Radiação global (Rg) e Umidade relativa do Ar (UR) coletados na Estação Meteorológica da UFERSA durante o período experimental

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, esquema fatorial $(3 \times 3) + 1$, com quatro repetições, totalizando 40 parcelas experimentais, constituídas por uma fileira de seis plantas (Figura 3). Os tratamentos consistiram da interação de 3 lâminas de irrigação relacionadas a reposição da disponibilidade hídrica da cultura a partir da estimativa da evapotranspiração da cultura - ETc (L1 = 33; L2=66 e L3= 100%) e três níveis de salinidade da água de irrigação indicadas pela condutividade elétrica - CEa (S1=0,5; S2=2,5 e S3=4,5 dS m⁻¹), mais um tratamento controle (T0), que correspondeu às plantas irrigadas somente com as precipitações ocorridas após 60 dias após o transplante (DAT).

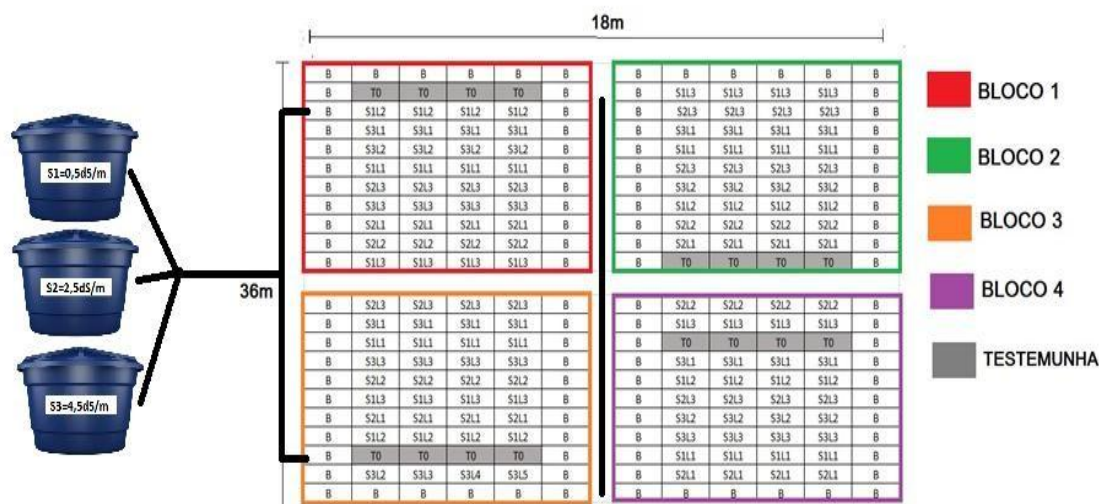


Figura 3. Croquis da área experimental com a disposição das parcelas e respectivos tratamentos

Antes do transplântio, foi realizado o preparo da área que procedeu com uma gradagem na camada de 0,20 m de profundidade do solo, seguida de abertura de cova nas dimensões de 0,20 × 0,20 × 0,10 m com espaçamento 3,0 × 1,5 m. A adubação de fundação das covas foi realizada com 50 g de MAP (52% P₂O₅ e 11% N) por cova, seguido de transplântio de uma muda por cova.

Para estabelecimento da cultura, até 60 DAT, utilizou-se irrigação similar para todos os tratamentos, a partir de uma linha de gotejamento por fileira regulada a pressão de serviço de 0,5 Bar, adotando eficiência de irrigação de 95%, molhando faixa contínua em espaçamento 0,2 m e vazão 1,5 l/h, utilizando água de abastecimento local da Companhia de Água e Esgoto do Rio Grande do Norte – (CE = 0,5 dS m⁻¹ e RAS = 2,23), sendo instituída três irrigações semanais de 10 min cada (Figura 3).

A partir dos 60 DAT, com stand estabelecido, houve suspensão na irrigação do tratamento testemunha (T0). Entre os tratamentos irrigados, passou-se a adotar o sistema de microtubos, variando as lâminas de irrigação por tratamento. Conforme a pressão de serviço calculada que chegava em cada planta, utilizou-se diferentes diâmetros de microtubos (L1 = 1 emissor de 1,5mm de diâmetro interno; L2 = 2 emissores de 1,5 mm e L3 = 1 emissor de 3,0 mm

de diâmetro) – além de diferentes comprimentos dos emissores, calculados pela equação Eq. 3, adaptada a partir de equações sugeridas por Souza; Botrel (2004) e Frizzone *et al.* (2012), diferenciando a vazão para $L1 = 30 \text{ L h}^{-1}$, $L2 = 60 \text{ L h}^{-1}$ e $L3 = 90 \text{ L h}^{-1}$, conforme mostrado na Figura 4.

$$L = 2,237 \left(\frac{H \cdot d^{4,75}}{q^{1,75}} \right) - 0,01427 q^{0,25} d^{0,75} \left(1,27 \ln \frac{q}{d} + 0,1 \right) \quad \text{Eq. 3}$$

Em que,

L – Comprimento do microtubo (m);

H – Carga hidráulica, que é a pressão na entrada do microtubo, considerando que a saída do microtubo está no mesmo plano da entrada (m);

d – Diâmetro interno do microtubo (mm);

q – vazão do microtubo, em (L h^{-1}).

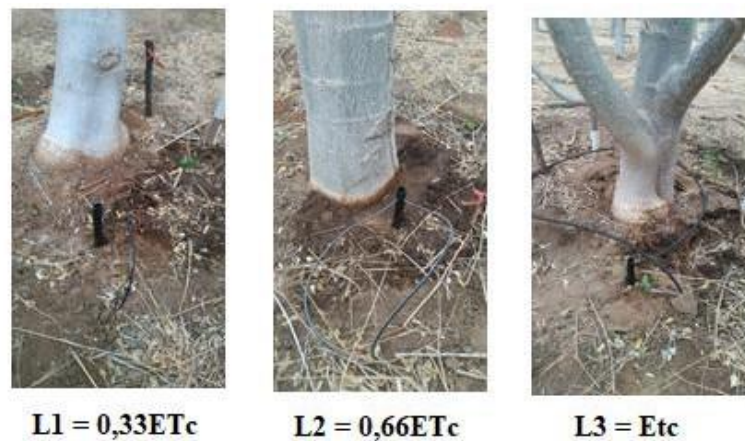


Figura 4. Disposição dos microtubos dentro dos sulcos e próximo ao caule, com diferentes diâmetros de mangueiras e emissores entre plantas para controle da vazão

A água de irrigação não salina ($0,5 \text{ dS m}^{-1}$) foi proveniente da água de abastecimento da Companhia de Águas e Esgoto do Rio Grande do Norte (CAERN), no município de Mossoró-RN. As águas salinas ($2,5$ e $4,5 \text{ dS m}^{-1}$) originaram-se de diluição de soluções de NaCl (155 g L^{-1}), $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (625 g L^{-1}) e água-mãe com concentração de 29° Baumé ($\text{Mg}^{2+} = 54,30 \text{ g L}^{-1}$, $\text{Na}^+ = 48,82 \text{ g L}^{-1}$ e $\text{K}^+ = 14,89 \text{ g L}^{-1}$) em água não salina de modo a obter uma proporção molar de cargas final de 7:2:1 (Na:Ca:Mg), de acordo com a metodologia de Medeiros (1992), simulando a composição média das águas salobras utilizadas para irrigação no semiárido nordestino, com aferição da CEa com condutivímetro de bancada digital CD-820 (Instrutherm, São Paulo, São Paulo, Brasil), sua composição química é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Composição química das águas de abastecimento e das águas salobras sintéticas

CE	Na	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃ ⁻
----- g/L -----						
S1 ($0,5 \text{ dS m}^{-1}$)	2,5	1,5	1,0	1,3	0,2	3,5
S2 ($2,5 \text{ dS m}^{-1}$)	12,5	6,5	3,5	15,0	1,0	6,5
S3 ($4,5 \text{ dS m}^{-1}$)	25,0	13,0	7,0	37,0	2,0	6,0

CE = Condutividade elétrica; Ca= Cálcio; Mg= Magnésio; Na = sódio; Cl =Cloroeto; SO₄= Sulfato e HCO₃⁻ =Bicarbonato

Com a finalidade de otimizar a distribuição de água na zona radicular das plantas, reduzindo perdas por evaporação ou escoamento superficial, garantiu-se a formação e preservação de sulcos circulares de $0,60 \text{ m}$ de diâmetro ao longo do experimento a partir dos tratos culturais necessários ao bom desenvolvimento da cultura.

A pré-irrigação, até 60 DAT, foi de 46 mm de água. A aplicação dos tratamentos aconteceu em dois períodos sucessivos de estiagem na região, 60 DAT a 221 DAT (PS1) e 374 DAT a 555 DAT (PS2), sendo suspenso durante o período de precipitação (PP) entre os dias 222 a 373 DAT. No primeiro período seco (PS1), até 221 DAT (fevereiro/2023), foram aplicadas na irrigação: L1= $107,6$; L2= $215,2$ e L3= $322,9 \text{ mm}$. O período de precipitação (PP) ocorreu entre os meses de fevereiro e julho de 2023, e não houve aplicação de tratamentos durante esse período. No início do segundo período seco (PS2), reiniciaram as aplicações de tratamentos na irrigação, totalizando L1= $156,9$; L2= 266 e L3= 376 mm até o último corte aos 555 DAT. Juntando os dois períodos,

totalizou-se L1=264,5; L2= 481,2 e L3= 698,9 mm de água na irrigação/tratamento, conforme descrito na Figura 5.

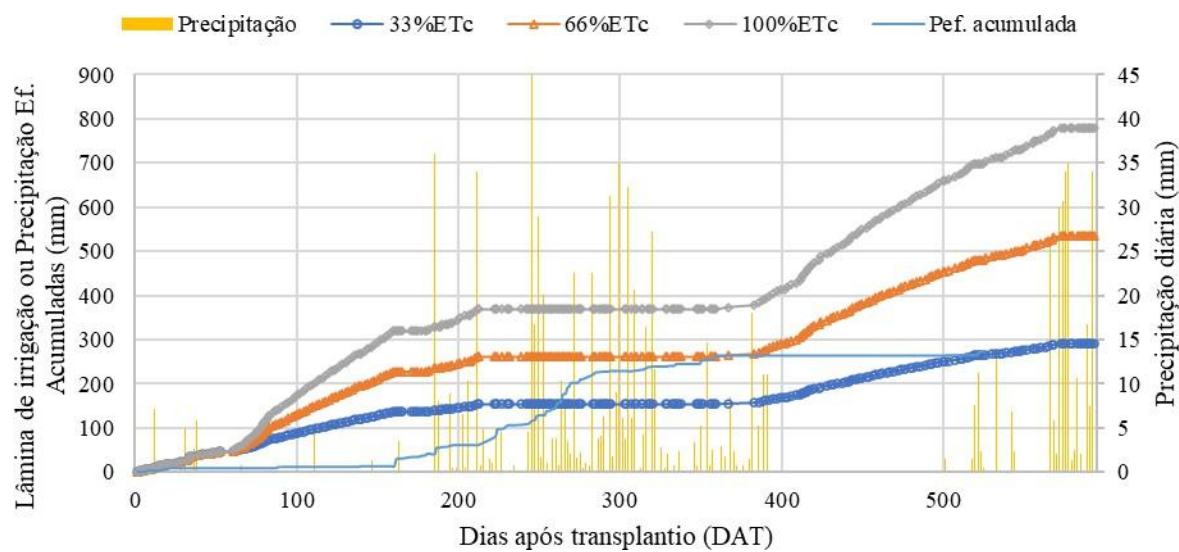


Figura 5. Lâmina de irrigação acumulada durante o experimento, precipitação diária e estimativa da precipitação efetiva acumulada

O monitoramento de salinidade do solo aconteceu a cada seis meses, a partir de amostragem de solo coletadas na área molhada pela irrigação ao redor das plantas, realizando as análises químicas do solo, conforme destacados na Tabela 3.

Tabela 3. Período de coleta de solo para avaliação das análises de solo e total de dias de aplicação de tratamentos antes de cada amostragem

Período de coleta	Mês da coleta	Período de aplicação dos tratamentos
PS1	Janeiro/23	60 a 167 DAT
PP	Julho/23	Sem aplicação
PS2	Janeiro/24	371 a 555 DAT

Dias após o transplântio = DAT

As coletas de solo em cada parcela experimental foram realizadas em dois pontos: nas profundidades de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m. As análises laboratoriais foram realizadas no Laboratório de Relação Água Solo e Planta do LASAPSA, de acordo com os procedimentos do Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes Teixeira *et al.* (2017) para determinação do pH, condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CEes), relação de adsorção de sódio do

extrato de saturação do solo (RASes), ambos estimados a partir da CE e da RAS medidas no sobrenadante feito na proporção de uma parte de solo para duas de meia de água destilada.

Os dados obtidos foram submetidos a análise de variância (ANOVA), verificando-se o grau de significância ao nível de 5%, conforme descrito por Banzato e Kronka (2013). Os dados que apresentaram diferença significativa entre tratamentos foram submetidos aos testes de Tukey, entre tratamentos, e de Dunnet entre os tratamentos e a testemunha.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 4 evidencia as médias de tensão medidas pelos tensiômetros instalados no bloco 1 da área experimental. O uso de tensiômetros mantém a tensão da água no solo próxima a zona radicular da planta, garantindo eficiência do uso da água e seu equilíbrio osmótico (Bosse; Durner; Peter, 2024), por isso foram instalados tensiômetros a 0,15 m de profundidade como referência para determinação do momento da irrigação, enquanto outros foram colocados a 0,35 m de profundidade indicando se a irrigação estava sendo eficiente, sem excesso ou falta de água.

Tabela 4. Tensão média da água no solo no período sem chuvas (60 a 210 DAT e 371 a 555 DAT), considerando as profundidades de 0,15; 0,35 e 0,55 m

Profundidade (m)	S1L1	S1L2	S1L3	S2L1	S2L2	S2L3	S3L1	S3L2	S3L3
Tensão da água no solo (kPa)									
0,55			10,8						
0,35	35,0	15,3	9,5	17,1	16,0	8,3	14,1	9,9	11,3
0,15	36,4	10,6	7,9	15,2	9,6	9,6	13,8	11,6	9,8

A tensão da água no solo é um parâmetro para definição do manejo da irrigação, devendo-se proceder com a irrigação sempre que a tensão atingir nível crítico que não afete o desempenho da cultura (Vilas Boas et al., 2011), tendo sido utilizado como referência para determinação do turno de rega a leitura dos tensiômetros instalados no tratamento de irrigação plena (S1L3). Comparando-o com os tratamentos de água de menor salinidade (S1), percebeu-se que S1L1 e S1L2 apresentaram médias de tensão maior que S1L3 nas profundidades 0,15 e 0,35 m, evidenciando que a disponibilidade hídrica de 33%ETc e 66%ETc na irrigação com a água de

menor salinidade proporcionaram estresse hídrico na zona radicular em relação aos demais tratamentos.

Os tratamentos S1L1; S2L3 E S3L2 obtiveram inversão na tensão da água apresentando maiores tensões da água na profundidade 0,15 m em relação as suas respectivas profundidades de 0,35 m, o que evidencia o acúmulo de sais na zona radicular e desequilíbrio osmóticos nas plantas nos tratamentos, fator não evidenciado em S2L1; S2L2 e S3L1, portanto a menor disponibilidade hídrica nestes tratamentos controlou a deposição de sais no solo, favorecendo o equilíbrio osmótico da planta.

A menor tensão da água no solo na profundidade de 0,35 m, referenda a otimização da irrigação nestes tratamentos mantendo o teor de água do solo entre irrigações sem causar desequilíbrio osmótico com estresse hídrico ou lixiviação desta água no perfil do solo (Smagin *et al.*, 2018). Isso também evidencia que a redução do potencial osmótico devido ao aumento da salinidade, diminuiu a transpiração da planta, consequentemente, a evapotranspiração; aumentando o teor de água no solo em comparação as plantas irrigadas com água de menor salinidade.

A Figura 6 apresenta as médias das curvas de tensão (kPa) nos meses de aplicação de tratamentos, considerando as médias dos tensiômetros instalados nas profundidades 0,15 e 0,35 m, onde os tratamentos referentes a lâmina máxima de irrigação de (100%ETc) apresentaram tensão constante e inferior durante todo o período, com média de 8,9 kPa em PS1 e 9,1 kPa em PS2, totalizando média em 9,0 kPa durante a aplicação dos tratamentos.

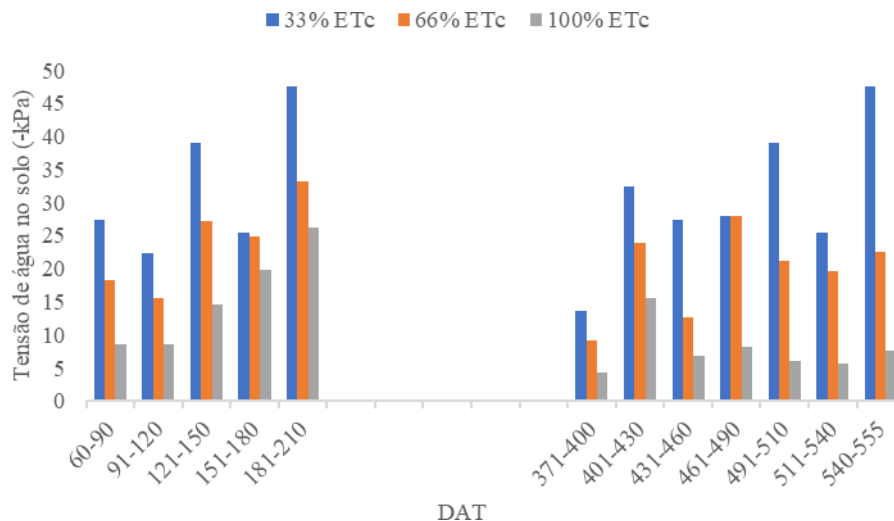


Figura 6. Valores médios da Tensão da água no solo em diferentes períodos em que foram aplicados os tratamentos de irrigação (60 a 210 DAT e 371 a 555 DAT), das estações secas, considerando a média das profundidades 0,15 – 0,35 m

Os tratamentos com reposição hídrica de 33%ETC e 66%ETC apresentaram valores bem acima do constatado para L3 (100%ETC) nos dois períodos secos, com respectivas médias 23,8 e 13,8 kPa de L1 e L2, totalizando, em PS1 as médias 22,1 e 12,6 kPa, respectivamente, em PS2 as médias 25,6 e 16,1 kPa; portanto inversamente proporcional ao volume de água aplicado na irrigação destes tratamentos. O monitoramento de tensiômetros durante o período chuvoso demonstrou dispensável a irrigação durante esse período, uma vez que as tensões no tratamento considerado padrão para reposição de água apresentaram valores abaixo da tensão crítica pré-estabelecida.

A demanda hídrica das plantas é diferenciada de acordo com a sua fase fenológica, necessitando assim, de um coeficiente de cultura específico (K_c) para cada uma das fases. Assim, Silva *et al.* (2017) propuseram o cálculo do suprimento de água via irrigação suplementar que requer o conhecimento da evapotranspiração da cultura (ETC) para que o manejo dos recursos hídricos seja eficiente (Rossato *et al.*, 2022). Os valores de K_c durante os períodos de irrigação

após o plantio variou de 0,3 a 0,5 nos diferentes períodos de desenvolvimento da cultura em períodos sem chuvas, conforme detalhado na Figura 7.

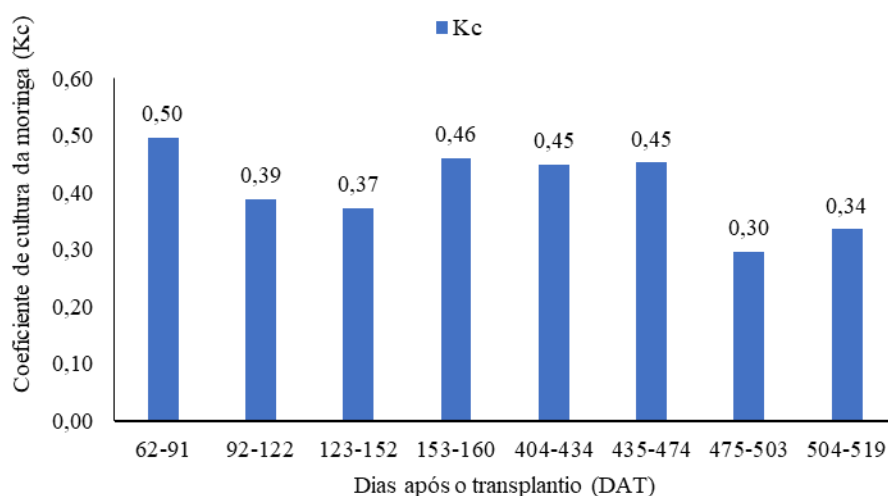


Figura 7. Médias do coeficiente de cultura (K_c) da moringa sob irrigação localizada para diferentes períodos nas estações secas de 2022 e 2023. Transplantio em 15/07/2022.

No primeiro período seco (PS1), foi registrado o maior valor de K_c em todo experimento, que ocorreu entre 92 e 121 DAT ($K_c=0,5$) no início do crescimento vegetativo quando a planta possuía apenas 1 ramo. Após a poda de formação, que estimulou a ramificação das plantas, houve diminuição do K_c até 0,39 nos períodos de 122 e 152 DAT, até representar 0,37 entre 153 e 182 DAT. Aos 210 DAT, a aproximação da segunda poda de produção, quando as plantas atingiram 1,5 m, registrou-se aumento de K_c para 0,46 entre 150 e 160 DAT.

Entre 190 e 434 DAT ocorreu o período de precipitação pluvial, interstício que impossibilitou a determinação do K_c por conta da presença de chuva irregulares. No segundo período seco, ocorreram duas podas de produção aos 435 e 495 DAT, mantendo o $K_c=0,45$ logo após primeira poda do período entre 434 e 404 DAT e registrando o menor valor de $K_c=0,30$ logo após a segunda poda, devido ao corte das plantas e período de registro das maiores ETo 's durante a experimentação. Santos *et al.* (2017) determinaram o K_c da moringa de 0,73 a 1,73 nos

diferentes estados fenológicos, valores bem acima ao determinado neste trabalho, isto porque avaliou-se através de lisímetros de drenagem e com poucas plantas de bordadura.

Neste trabalho, a determinação de K_c foi baseada no monitoramento de umidade do solo, o que torna o cálculo mais preciso em relação à quantidade de água utilizada pela zona radicular para desenvolvimento da planta, permitindo acompanhar a disponibilidade real da água à zona radicular e controlar com eficiência do volume da água de irrigação, eliminando desperdício por percolação profunda descontrolada (Hunduma; Kebede, 2020). Além disso, o controle real da umidade do solo na zona radicular é essencial na otimização da irrigação em função da nutrição e crescimento das plantas, a infiltração de água no solo, além de influenciar diretamente na transpiração das plantas (Mukhlisin *et al.*, 2021). O uso da irrigação localizada, com uma área molhada inferior a 30% da superfície do solo e irrigações com turno de rega de 2 a 3 dias, reduz de forma significativa a evaporação da água no solo, diminuindo a evapotranspiração da cultura (Pereira *et al.*, 2018).

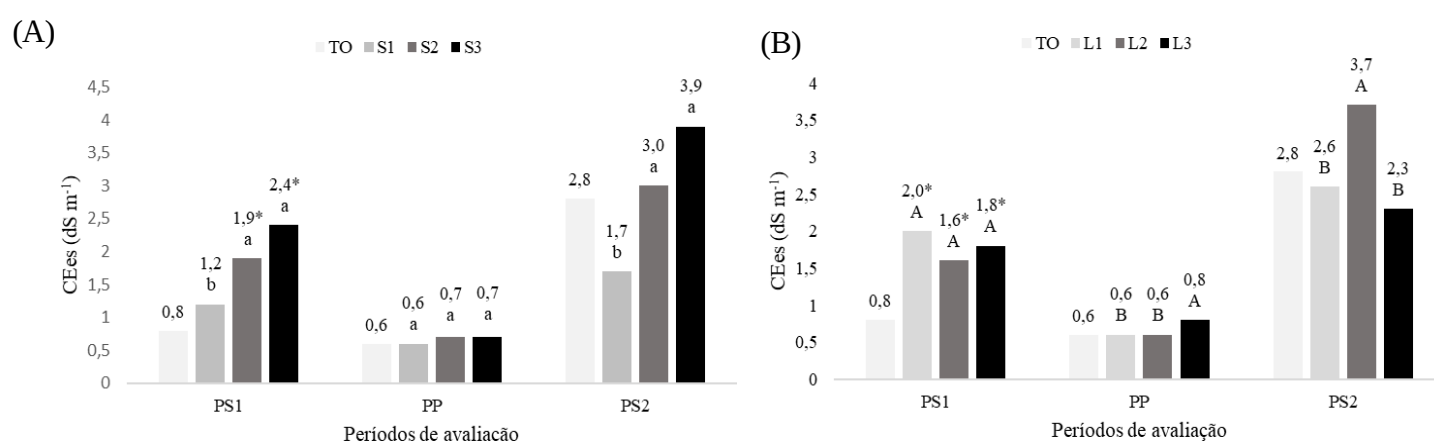
A condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CEes) apresentou média de 1,7 dS m⁻¹ em PS1; decrescendo para 0,7 dS m⁻¹ em PP e aumentando novamente em PS2 para 3,0 dS m⁻¹ (Tabela 5). Esses dados demonstram que a aplicação dos tratamentos no período seco influenciou positivamente para o acúmulo de sais no solo, enquanto período chuvoso proporcionou o controle eficiente da CEes, minimizando o estresse osmótico.

Tabela 5. Resumo da análise de variância para a condutividade elétrica do extrato de saturação CEes considerando a média da camada do solo de 0,0 – 0,4 m no cultivo de moringa nos períodos de avaliação sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal)

FV	GL	PS1	PP	PS2
		CEes (dS m ⁻¹)		
		Significância do teste F		
Fat x T0	1	0,000**	0,473 ^{ns}	0,393 ^{ns}
Sal	2	0,000**	0,246 ^{ns}	0,003**
Lam	2	0,161 ^{ns}	0,002**	0,009**
Sal x Lam	4	0,680 ^{ns}	0,799 ^{ns}	0,492 ^{ns}
DMS (Tukey) entre Sal ou Lam		0,50	0,11	1,40
DMA (Dunnett) To vs.Sal ou Lam		0,66	0,15	1,86
CV(%)		28,4	17,0	45,9
Média		1,7	0,7	3,0

FV = Fator de variância; GL = Grau de liberdade; PS1 = Primeiro período seco; PP = Período de precipitação; PS2 = Segundo período seco; CEes = Condutividade elétrica do extrato de saturação; Fat = Médias dos tratamentos irrigados; dms = Diferença mínima significativa; CV = Coeficiente de variação; T0 = Tratamento sem irrigação; ns = Não significativo; * = Significativo à 5% de probabilidade e ** = Significativo à 1% de probabilidade

Verifica-se na análise de variância a não significância ($p > 0,05$) entre salinidade $\times$ lâminas de irrigação para CEes nos períodos avaliados, considerando a média da camada do solo de 0,0-0,4 m (Figura 8). Analisando os efeitos isolados em relação ao controle, todos os tratamentos irrigados apresentaram-se superiores ($p < 0,01$) em acúmulo de sais no solo no PS1, que foram dispersos no solo ou aproveitados pela zona radicular da planta a partir de 167 DAT.



*Diferença significativa em relação ao tratamento controle (T0) pelo teste de Dunnett à 5% de probabilidade. Letras minúsculas iguais não diferem entre si para os níveis de salinidade pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$), e letras maiúsculas iguais não diferem entre si as lâminas de irrigação pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$), dentro de cada período de avaliação.

Figura 8. Condutividade elétrica do extrato de saturação do solo no cultivo de moringa em diferentes períodos de avaliação sob diferentes níveis de salinidade (A) e lâminas de irrigação (B)

Ao final dos períodos secos (com a irrigação), PS1 e PS2, o fator salinidade foi significativo ($p \leq 0,01$), sendo os valores $S1 < S2 < S3$ diretamente proporcionais ao aumento da concentração de sais na água de irrigação nos dois períodos. O fator lâmina de irrigação foi significativo ($p \leq 0,01$) ao final dos períodos PP e PS2. Durante o período chuvoso, houve a ocorrência da lixiviação dos sais acumulados na zona radicular em relação a PP1, na proporção de 42,82% em L1 e 60% nos tratamentos L2 e L3, o que demonstra maior acúmulo de sais na zona radicular no tratamento com menor disponibilidade hídrica.

Em relação a PS2, percebeu-se maior acúmulo de sais no tratamento com disponibilidade hídrica 66%ETc (L2), isto devido a maior lixiviação de sais+água nos tratamentos irrigados com 100%ETc e menor deposição desses sais no tratamento com disponibilidade hídrica 33%ETc (L1), priorizando a eficiência no uso da água de irrigação e no planejamento de drenagem e lixiviação.

O volume de precipitação anual em PP demonstrou potencial para lixiviar os sais solúveis no perfil do solo e mitigar os efeitos de salinização superficial, enquanto a alternância entre água doce e salina aliada ao método de irrigação localizada por microtubos permitiu um controle eficiente da condutividade elétrica da água (CE) na zona radicular da planta.

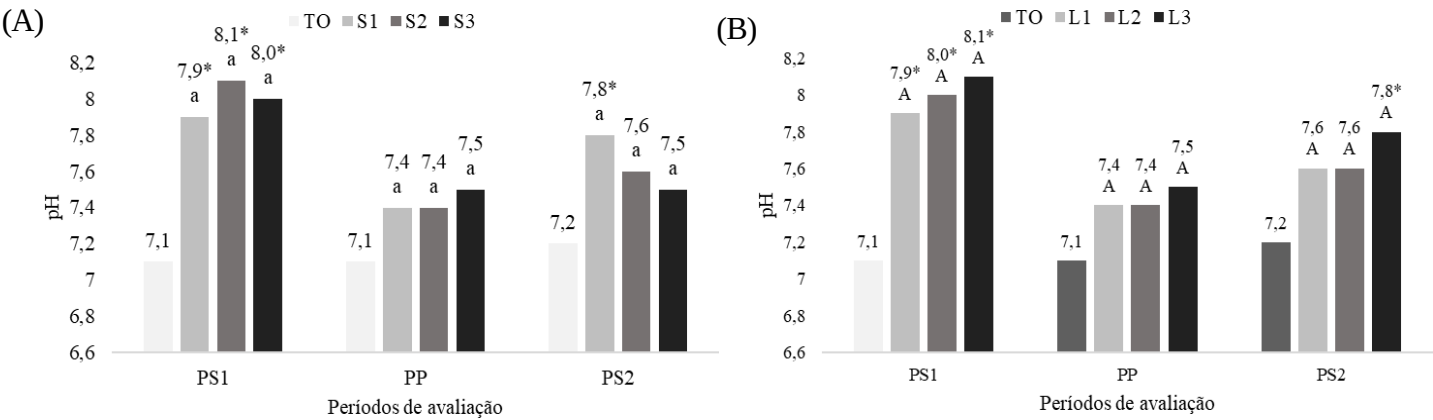
O pH do solo apresentou diferença significativa entre os tratamentos irrigados e o sem irrigação nos dois períodos secos (PS1 e PS2), as médias variaram de 7,9; 7,4; 7,6 nos períodos PS1; PP e PS2 respectivamente (Tabela 6) devido a água de irrigação mais salina influenciar diretamente na acidez do solo (Costa, 2019).

Tabela 6. Resultados de análise para a pH considerando a média da camada do solo de 0,0-0,4 m no cultivo de moringa nos períodos de avaliação sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal)

FV	GL	PS1	PP	PS2
		pH		
		Significância do teste F		
Fat x T0	1	0,000**	0,184 ^{ns}	0,044*
Sal	2	0,356 ^{ns}	0,950 ^{ns}	0,192 ^{ns}
Lam	2	0,346 ^{ns}	0,753 ^{ns}	0,857 ^{ns}
Sal x Lam	4	0,915 ^{ns}	0,055 ^{ns}	0,075 ^{ns}
DMS (Tukey) entre Sal ou Lam		0,38	0,40	0,41
DMS (Dunnett) To vs Sal ou Lam		0,51	0,53	0,55
CV(%)		4,7	5,3	5,2
Média		7,9	7,4	7,6

FV = Fator de variância; GL = Grau de liberdade; PS1 = Primeiro período seco; PP = Período de precipitação; PS2 = Segundo período seco; Fat = Médias dos tratamentos irrigados; dms = diferença mínima significativa; CV = Coeficiente de variação; T0 = tratamento sem irrigação; ns = não significativo; * = significativo à 5% de probabilidade e ** = significativo à 1% de probabilidade

Comparando estes dados com o pH inicial antes da implantação do experimento (pH=8,11), houve redução do pH em todos os períodos, enquanto o esperado é que a irrigação com água aumente o pH e a salinidade do solo. Essa mitigação do efeito da salinidade deu-se devido ao período de precipitação, sem aplicação de tratamentos, que proporcionou a alternância entre água doce e salina, aliado ao método de irrigação localizada por microtubos que favoreceu a absorção de sais na zona radicular da planta (Du *et al.*, 2023; Xiao; Zhou, 2023).



*Diferença significativa em relação ao tratamento controle (T0) pelo teste de Dunnett à 5% de probabilidade. Letras minúsculas iguais não diferem entre si para os níveis de salinidade pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$), e letras maiúsculas iguais não diferem entre si as lâminas de irrigação pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$), dentro de cada período de avaliação.

Figura 9. pH do solo no cultivo de moringa nos períodos de avaliação sob níveis de salinidade (A) e lâminas de irrigação (B)

A irrigação com água salina aumenta a salinidade superficial, o sódio trocável e a razão de adsorção de sódio (RAS), o que pode comprometer a estabilidade dos agregados do solo e reduzir a porosidade (Wang *et al.*, 2022). Os resultados da Tabela 7 mostraram diferença significativa ($p \leq 0,01$) nos três períodos avaliados entre os tratamentos irrigados e o sem irrigação, indicando que o aumento da salinidade da água de irrigação levou a uma RAS do solo mais alta ($T0 < S1 < S2 < S3$), o que evidencia o acúmulo de sódio no solo a partir da irrigação mínima de 33%ETc.

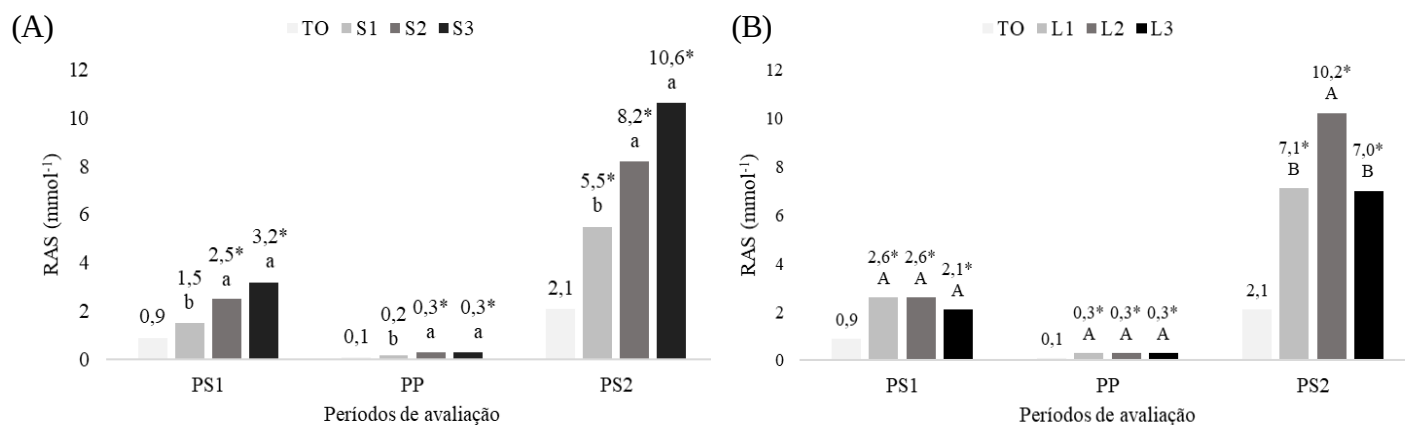
Tabela 7. Resultados de análise para a RAS_{es} considerando a média da camada do solo de 0,0-0,4 m no cultivo de moringa nos períodos de avaliação sob lâminas de irrigação (L) e níveis de salinidade (S)

FV	GL	PS1	PP	PS2
		RAS _{es} (mmol ⁻¹)		
		Significância do teste F		
Fat x T0	1	0,003**	0,004**	0,000**
Sal	2	0,000**	0,011**	0,000**
Lam	2	0,317 ^{ns}	0,107 ^{ns}	0,003**
S x L	4	0,746 ^{ns}	0,149 ^{ns}	0,353 ^{ns}
dms (Tukey) entre S ou L		2,16	0,10	2,41
dms (Dunnett) To vs.S ou L		2,88	0,13	3,21
CV(%)		38,6	33,0	31,7
Média		2,3	0,7	7,2

FV = Fator de variância; GL = Grau de liberdade; PS1 = Primeiro período seco; PP = Período de precipitação; PS2 = Segundo período seco; Fat = Médias dos tratamentos irrigados; RAS= Razão de adsorção de sódio DMS = diferença mínima significativa; CV = Coeficiente de variação; T0 = Tratamento sem irrigação; ns = Não significativo; * = Significativo à 5% de probabilidade e ** = Significativo à 1% de probabilidade

Quanto à disponibilização hídrica para a planta, a maior adsorção de sódio foi significativa ($p \leq 0,01$) apenas em longo prazo (PS2), encontrando-se maior concentração em Na^+ em L2 (66%ETc). Portanto, evidencia-se que a restrição hídrica de 33% ETc possibilita o uso do Na^+ presente na água de irrigação pela planta, sem excesso para deposição no solo, enquanto a irrigação plena (100%ETc) proporciona volume favorável para lixiviação de sais no perfil do solo.

Em relação ao fator salinidade na água de irrigação, percebeu-se diferença significativa entre tratamentos nos períodos avaliados (PS1; PP e PS2), onde T0 e S1 apresentaram-se superior aos demais com menor adsorção de sódio em relação a S2 e S3, corroborando com o estudo de Silva *et al.* (2021) em que a RAS do solo aumentou proporcionalmente com a condutividade elétrica da água de irrigação (Figura 10).



*Diferença significativa em relação ao tratamento controle (T0) pelo teste de Dunnett à 5% de probabilidade. Letras minúsculas iguais não diferem entre si para os níveis de salinidade pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$), e letras maiúsculas iguais não diferem entre si as lâminas de irrigação pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$), dentro de cada período de avaliação.

Figura 10. Razão da adsorção de sódio (RAS) do solo no cultivo de moringa nos períodos de avaliação sob níveis de salinidade (A) e lâminas de irrigação (B)

O uso de águas subterrâneas salinas é comum na região Nordeste, elevando os teores de sais no solo quando utilizadas para irrigação local, especialmente em profundidades superficiais, estando o Na^+ entre os íons predominantes em áreas cultivadas e desertificadas (Pessoa *et al.*, 2022). Nesta pesquisa, a irrigação a partir de 33%ETc favoreceu o acúmulo de sais no solo de acordo com o aumento da CE da água de irrigação, proporcionando, a longo prazo, maior acúmulo de Na^+ no solo quando na água de irrigação teve 2,5 dS m^{-1} .

Além disso, o volume de precipitação anual em PP demonstrou potencial para lixiviar os sais solúveis no perfil do solo e mitigar os efeitos de salinização superficial, caracterizando-o como favorável no manejo adequado de irrigação e drenagem das práticas agrícolas para atenuar a salinização ou sodificação dos solos semiáridos.

4. CONCLUSÕES

A implementação da irrigação controlada por tensiometria mostrou-se eficiente para o manejo hídrico em condições semiáridas, reduzindo significativamente a evapotranspiração da cultura (ET_c), apresentando coeficiente de cultura (K_c) de 0,3 a 0,5 até o segundo ano de cultivo da moringa.

O monitoramento contínuo dos atributos de CEEs e Na⁺, associado as chuvas que ocorrem na região entre fevereiro e junho de cada ano, mitigou os riscos de salinização secundária ao utilizar recursos hídricos salinos e proporcionou equilíbrio dos níveis de pH, sem induzir processos de alcalinização ou acidificação do solo.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [s. l.], p. 711–728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- AMARAL, K. D. S.; NAVONI, J. A. Desalination in rural communities of the Brazilian semi-arid region: Potential use of brackish concentrate in local productive activities. **Process Safety and Environmental Protection**, [s. l.], v. 169, p. 61–70, 2023.
- ARAÚJO, A. S. F. *et al.* From desertification to restoration in the Brazilian semiarid region: Unveiling the potential of land restoration on soil microbial properties - ScienceDirect. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 351, 2024.
- AZEEM, M. *et al.* Salinity stress improves antioxidant potential by modulating physio-biochemical responses in *Moringa oleifera* Lam. **Springer Science and Business Media LLC**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 1–17, 2023. <http://doi.org/10.1038/s41598-023-29954-6>
- BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. do N. **Experimentação Agrícola**. 4. ed. Brasil: Funep, 2013. Disponível em: <https://livraria.funep.org.br/product/experimentac-o-agricola-4-edic-o/>.
- BERNARDO, S. *et al.* **Manual de irrigação**. [S. l.]: Viçosa-MG: Ed. UFV, 2019. v. 9
- BOSSE, J.; DURNER, W.; PETER, A. Effect of salt concentration on osmotic potential in drying soils—Measurement and models. **European Journal of Soil Science**, [s. l.], v. 75, n. 5, p. 823–833, 2024.
- BOUMENJEL, A.; PAPADOPOULOS, A.; AMMARI, Y. Growth response of *Moringa oleifera* (Lam) to water stress and to arid bioclimatic conditions. **Agroforestry Systems**, [s. l.], v. 95, n. 5, p. 823–833, 2021. <http://doi.org/10.1007/s10457-020-00509-2>

COSTA, J. D. O. *et al.* Assessing the water use efficiency of irrigated fruit crops in semi-arid regions of Brazil using remote sensing and meteorological data. **Irrigation and Drainage**, [s. l.], v. 73, n. 3, p. 974–987, 2024.

COSTA, D. de O. **Utilização de água produzida do petróleo na produção e capacidade de fitoextração de cactácea no semiárido brasileiro**. 2019. 135 f. Tese (Doutorado em Manejo de Solo e Água) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró-RN, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/items/b3f69cc3-33c0-42bb-a09a-3631d5c57d14>. Acesso em: 25 mar. 2025.

DEVKOTA, S.; BHUSAL, K. K. *Moringa oleifera* : A miracle multipurpose tree for agroforestry and climate change mitigation from the Himalayas – A review. **Cogent Food & Agriculture**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 1805951, 2020.

DU, Y. *et al.* Drip irrigation in agricultural saline-alkali land controls soil salinity and improves crop yield: Evidence from a global meta-analysis. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 880, p. 163226, 2023.

FATIMA, N. *et al.* Germination, growth and ions uptake of moringa (*Moringa oleifera* L.) grown under saline condition. **Journal of Plant Nutrition**, [s. l.], v. 41, n. 12, p. 1555–1565, 2018.

FRIZZONE, J. A. *et al.* **Microirrigação: Gotejamento e Microaspersão**. Maringá: EDUEM, 2012.

HUNDUMA, S.; KEBEDE, G. Indirect Methods of Measuring Soil. **African Journal of Basic & Applied Sciences**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 37–55, 2020.

MARANGON, B. B. *et al.* Reuse of treated municipal wastewater in productive activities in Brazil's semi-arid regions. **Journal of Water Process Engineering**, [s. l.], v. 37, p. 101483, 2020.

MEDEIROS, J. F. **Qualidade da água de irrigação e evolução da salinidade nas propriedades assistidas pelo “GAT” nos Estados do RN, PB e CE**. 1992. 196 f. Dissertação - Universidade Federal da Paraíba - Campus II - Campina Grande, Campina Grande, 1992. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/jspui/handle/riufcg/2896>. Acesso em: 1 ago. 2025.

MELO, A. R. D. *et al.* Effect of wastewater and phosphate fertilization on photosynthetic pigments and macronutrients of *Moringa oleifera* Lam. **Revista Árvore**, [s. l.], v. 49, n. 1, p. 1–16, 2025.

MUKHLISIN, M. *et al.* Monitoring rainfall intensity and moisture water content using soil column experiment. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 1108, n. 1, p. 012007, 2021.

NUNES, K. G. *et al.* Groundwater resources for agricultural purposes in the Brazilian semi-arid region. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 26, n. 12, p. 915–923, 2022.

OLIVEIRA JUNIOR, V. M. D. *et al.* Crescimento vegetativo da moringa em distintos regimes de irrigação associados a composições de diferentes substratos. **IRRIGA**, [s. l.], v. 1, n. 4, p. 646–652, 2021.

PEREIRA, F. S. G. *et al.* Moringa oleifera: a promising agricultural crop and of social inclusion for Brazil and semi-arid regions for the production of energetic biomass (biodiesel and briquettes). **OCL**, [s. l.], v. 25, n. 1, p. D106, 2018.

PESSOA, L. G. M. *et al.* Assessment of soil salinity status under different land-use conditions in the semiarid region of Northeastern Brazil. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 141, p. 109139, 2022.

RAULINO, J. B. S.; SILVEIRA, C. S.; LIMA NETO, I. E. Assessment of climate change impacts on hydrology and water quality of large semi-arid reservoirs in Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], v. 66, n. 8, p. 1321–1336, 2021.

REICHARD, K.; TIMM, L. C. **Planta e atmosfera: Conceitos, processos e aplicações**. 4. ed. Barueri, SP: Manole, 2022.

RICHARDS, L. A. **The diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: U. S. Dept. Of Agriculture, 1969.

ROSSATTO, A. A. P. *et al.* Partição da evapotranspiração da cultura da soja em diferentes cultivares em cada estágio fenológico. **IRRIGA**, [s. l.], v. 27, n. 3, p. 477–492, 2022.

SANTOS, C. S. dos *et al.* Evapotranspiration and crop coefficients of Moringa oleifera under semi-arid conditions in Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 21, n. 12, p. 840–845, 2017.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5a edição. Brasília-DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1094003>. Acesso em: 22 abr. 2021.

SILVA, J. L. B. D. *et al.* Changes in the water resources, soil use and spatial dynamics of Caatinga vegetation cover over semiarid region of the Brazilian Northeast. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [s. l.], v. 20, p. 100372, 2020.

SILVA, P. F. *et al.* Determinação do coeficiente de cultivo da cultura do pimentão (*Capsicum annum*) por meio do lisímetro de drenagem. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, [s. l.], v. 11, n. 7, p. 2040–2051, 2017.

SILVA, T. A. *et al.* Efficiency of technologies to live with drought in agricultural development in Brazil's semi-arid regions. **Journal of Arid Environments**, [s. l.], v. 192, p. 104538, 2021.

SMAGIN, A. V. *et al.* Dependence of the Osmotic Pressure and Electrical Conductivity of Soil Solutions on the Soil Water Content. **Eurasian Soil Science**, [s. l.], v. 51, n. 12, p. 1462–1473, 2018.

SOIL TAXONOMY, N. C. S. S. (NCSS). **Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys**. 2. ed. [S. l.]: Soil Survey Staff, 2022. Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-06/Soil%20Taxonomy.pdf>. Acesso em: 16 maio 2025.

SOUZA, R. O. R. M.; BOTREL, A. T. Modelagem para o dimensionamento de microtubos em irrigação localizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 16–22, 2004.

TAVARES FILHO, G. S. *et al.* Desenvolvimento de mudas de Moringa oleífera (LAM) submetida a diferentes níveis de água salina. **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], v. 6, n. 7, p. 48671–48683, 2020.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. [S. l.]: Brasília, DF: Embrapa, 2017., 2017. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1085209>. Acesso em: 25 abr. 2022.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980.

VIJAYARAGAVAN, V. *et al.* Mechanisms of drought tolerance in Moringa: Strategies for mitigation and adaptation – Review. **Plant Science Today**, [s. l.], 2025. Disponível em: <https://horizonepublishing.com/journals/index.php/PST/article/view/4279>. Acesso em: 23 maio 2025.

VILAS BOAS, R. C. *et al.* Desempenho de cultivares de cebola em função do manejo da irrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 117–124, 2011.

WANG, Z. *et al.* Effect of long-term saline mulched drip irrigation on soil-groundwater environment in arid Northwest China. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 820, p. 153222, 2022.

XIAO, F.; ZHOU, H. Plant salt response: Perception, signaling, and tolerance. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 13, 2023.

CAPÍTULO II

RESPOSTA BIOMÉTRICA E PRODUTIVA DA MORINGA SUBMETIDA A IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO: A moringa é uma espécie que apresenta múltiplas potencialidades, fácil manejo e adaptação climática em climas áridos e semiáridos. Objetivou-se analisar os parâmetros morfofisiológicos da moringa cultivada em condições deficitárias de irrigação, a partir de restrição hídrica até 33%ETc ou salinidade de até 4,5 dS m⁻¹, visando qualificar seu potencial forrageiro no semiárido brasileiro. Utilizou-se área experimental de 0,3 ha, situada na Universidade Federal do Semi-Árido, município de Mossoró-RN-Brasil. O delineamento experimental apresentou-se em blocos casualizados, com quatro repetições em esquema fatorial 3x3+1, onde os tratamentos consistiram de 3 lâminas de irrigação (L1= 33%ETc; L2= 66%ETc; L3= 100%ETc) e 3 níveis de salinidade da água de irrigação (S1= 0,5; S2= 2,5; S3= 4,5 dS m⁻¹), além de um tratamento testemunha sem irrigação após os 60 dias após transplântio, no período de julho de 2022 a março de 2024. As características de altura das plantas, diâmetro do caule, produção de matéria verde e seca foram avaliadas em intervalos de 60 dias. Os dados foram submetidos a análise de variância e teste de Tukey e de Dunnet. Não houve variação significativa de crescimento ou produção da forragem relacionada ao efeito salinidade. O crescimento inicial da cultura apresentou redução superior ao percentual de diminuição da irrigação considerando a sua ETc em relação ao diâmetro e a altura da planta, enquanto os percentuais de massas verde e seca apresentaram produtividade crescente a partir do aumento da lâmina de irrigação, embora com taxa de crescimento inferior a proporcionalidade do aumento da lâmina.

Palavras-chave: agricultura sustentável; crescimento vegetativo; estresse hídrico; estresse salino

CHAPTER II

BIOMETRIC AND PRODUCTIVE RESPONSE OF MORINGA UNDER DEFICIT IRRIGATION IN THE BRAZILIAN SEMI-ARID REGION

ABSTRACT: Moringa is a species with multiple potentialities, easy management, and climatic adaptation in arid and semi-arid environments. This study aimed to analyze the morphophysiological parameters of moringa grown under deficit irrigation conditions, with water restriction up to 33%ETc or salinity up to 4.5 dS m⁻¹, to assess its forage potential in the Brazilian semi-arid region. An experimental area of 0.3 ha, located at the Federal University of Semi-Arid Region in the municipality of Mossoró-RN-Brazil, was used. The experimental design was arranged in randomized blocks with four replicates in a 3×3+1 factorial scheme. Treatments consisted of three irrigation depths (L1= 33%ETc; L2= 66%ETc; L3= 100%ETc) and three levels of irrigation water salinity (S1= 0.5; S2= 2.5; S3= 4.5 dS m⁻¹), in addition to a control treatment without irrigation after 60 days after transplanting, from July 2022 to March 2024. Plant height, stem diameter, and fresh and dry matter production were evaluated at 60-day intervals. Data were subjected to analysis of variance, Tukey's test, and Dunnett's test. No significant variation in forage growth or production was related to the salinity effect. Initial crop growth showed a reduction greater than the percentage decrease in irrigation relative to ETc in terms of stem diameter and plant height, while fresh and dry matter yields increased progressively with higher irrigation depths, though at a growth rate lower than the proportional increase in irrigation.

Keywords: sustainable agriculture; vegetative growth; water stress; salt stress

1. INTRODUÇÃO

A moringa é uma planta originária da região dos Himalaias, promissora para o cultivo em regiões áridas e semiáridas em virtude de suas características adaptativas a altas temperaturas e diferentes tipos de solos (Vásquez *et al.*, 2024). Dentre suas potencialidades, destacam-se o uso diversificado nas indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética, além de aplicações na produção de biocombustível e purificação da água (Gharsallah *et al.*, 2023; Jikah; Edo, 2024; Mahaveerchand; Abdul Salam, 2024; Saucedo-Pompa *et al.*, 2018). Quanto à salinidade, a moringa apresenta adaptações morfológicas e fisiológicas em condições adversas demonstrando tolerância positiva ao estresse abiótico, o que a torna uma espécie promissora para sistemas agroflorestais em zonas áridas, minimizando os efeitos negativos da seca e melhorando a qualidade do solo.

O cultivo da moringa no semiárido nordestino brasileiro é uma alternativa em potencial para a agricultura irrigada, devido apresentar crescimento rápido, resistência à seca e tolerância a solos com altos teores de sais minerais quando submetidas a fontes de água com altas concentrações de sais minerais (Chaves *et al.*, 2023; Lucena *et al.*, 2021). Entretanto, é necessário gerenciar o acúmulo desses sais no solo racionalmente em termos de qualidade e economia de água, uma vez que o uso de água salobra/salina na irrigação reduz significativamente a produtividade das culturas e pode causar degradação do solo, sendo necessário adequar técnicas de manejo e escolhas de espécies tolerantes a fim de mitigar esses efeitos negativos (Du *et al.*, 2023).

A biometria das plantas é fundamental para identificar características vegetais influenciáveis em condições desfavoráveis de plantio, auxiliando na identificação de variáveis resistentes a estresses abióticos e orientando práticas agrícolas benéficas para mitigar o desenvolvimento negativo de espécies tolerantes, fatores essenciais para o desenvolvimento sustentável dessa cultura em regiões afetadas por estresses ambientais (Boumenjel; Papadopoulos; Ammari, 2021). Nesse viés, Gobezie (2021) descreveu características de adaptação da moringa,

entre as quais a presença de enzimas antioxidantes mitigadoras do estresse oxidativo em condições de escassez hídrica e a morfologia de seu sistema radicular que favorece a absorção de água por meio da regulação estomática e acúmulo de protetores osmóticos, como a prolina.

Nesse contexto, há necessidade de definição de limiar crítico de salinidade e adequação de lâminas de irrigação otimizadas para sua produção sustentável em comparação ao manejo convencional de irrigação plena. Assim, objetivou-se analisar os parâmetros morfofisiológicos da moringa cultivada em condições deficitárias de irrigação, a partir de restrição hídrica até 33%ETc ou salinidade de até 4,5 dS m⁻¹, visando qualificar seu potencial forrageiro no semiárido brasileiro.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida entre julho de 2022 a março de 2024 em área experimental localizada no campus Leste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), pertencente ao Centro de Ciências Agrárias, no município de Mossoró, estado do Rio Grande do Norte (RN). A área está georreferenciada pelas coordenadas: 5°12'48'' de latitude Sul, 37°18'44'' longitude Oeste e altitude de 37 m acima do nível do mar. O clima semiárido foi classificado como BShs de acordo com Köppen, caracterizado por temperatura média anual de 26°C e precipitações escassas e irregulares geralmente entre 400 mm e 800 mm (Alvares *et al.*, 2013).

Antes da implantação das mudas no solo, realizou-se a caracterização do solo em critérios de salinidade e fertilidade, através da coleta de solo em Trado, tipo holandês (EQUILAB, Uberaba, MG, Brasil), amostras simples deformadas de solo nas profundidades de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m, homegeneizadas e transformadas em amostras compostas e analisadas física e quimicamente no Laboratório de Análises de Solo, Água e Planta do Semiárido (LASAPSA). De acordo com o SiBCS – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2018), o solo da foi classificado como Plintossolo Argilúvico, de textura franco arenosa (Areia = 0,75; Silte

= 0,13; Argila = 0,13 dag kg⁻¹), apresentando-se não sódico e não salino (CE < 4 dS m⁻¹; RAS < 15 e pH < 8,5) até a profundidade de 0,4m (Richards, 1969), conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização química quanto a fertilidade do solo antes da instalação do experimento

Fertilidade		0,0-0,2 (m)	0,2-0,4 (m)
pH (H ₂ O)		7,62	7,66
CE	dS m ⁻¹	0,19	0,18
K ⁺	cmol _c dm ⁻³	0,37	0,38
Ca ²⁺ Mg ²⁺	cmol _c dm ⁻³	1,91	1,97
Na ⁺	cmol _c dm ⁻³	0,35	0,37
Al ³⁺	cmol _c dm ⁻³	0	0
Al ³⁺ + H ⁺	cmol _c dm ⁻³	0	0
SB	cmol _c dm ⁻³	2,63	2,72
CTC	cmol _c dm ⁻³	2,63	2,72
V	%	100	100

pH = Potencial Hidrogênico – medidor de pH Marca Tecnal Modelo Tec-2 – Piracicaba-SP-Brasil; CE = Condutividade elétrica - condutivímetro de bancada digital CD-820 – Instrutherm São Paulo-SP-Brasil; K⁺ = potássio- Fotômetro de chama digital – Marca Werberlab – SC/PR, Brasil; Ca²⁺= Cálcio – Teixeira *et al*, 2017; Mg²⁺= Magnésio; Na⁺ = sódio Fotômetro de chama digital – Marca Werberlab – SC/PR, Brasil; Al³⁺ = Alumínio; Al³⁺ + H⁺ = Acidez do solo.

Para determinação do volume de água de irrigação no tratamento de irrigação plena – S1L3 (S1 - 0,5 dS.m⁻¹; L3 -100%ETc), considerou-se a umidade estimada pelo potencial matricial medido através de tensiômetros nas profundidades de 0,15; 0,35 e 0,55 m, entre os potenciais matriciais de -6 e -20 kPa, estimando o volume de água a aplicar em até 20 L, considerando o volume de aplicação de lâmina líquida de água na zona radicular da cultura, para a camada 0-0,5 m, e assumido um fator de molhamento de 0,30, e utilizando emissor com vazão estimada a aplicar 90 l h⁻¹ nos tratamentos de 100%ETc (L3).

Até os 60 DAT, com o objetivo de assegurar a correta fixação do stand de plantas, o manejo da irrigação foi uniformizado entre todos os tratamentos. A aplicação de água foi realizada via sistema de irrigação por gotejamento, empregando fita gotejadora com emissores de 0,4m até 30 dias. A partir desta data, o espaçamento foi ajustado para 0,2 m, usando duas fitas gotejadoras, garantindo um emissor por planta. A fonte hídrica foi a rede de abastecimento local, operada pela Companhia de Água e Esgoto do Rio Grande do Norte (CAERN), cuja água apresenta condutividade elétrica (CE) de 0,5 dS m⁻¹ e Razão de Adsorção de Sódio (RAS) de 1,00.

O monitoramento da necessidade hídrica foi realizado pela leitura dos potenciais matriciais em parcelas do tratamento de irrigação plena – S1L3 (S1 - 0,5 dS.m⁻¹; L3 -100%ETc) nas

profundidades de 0,15; 0,35 e 0,55 m, entre os potenciais matriciais de -6 e -20 kPa, estimando o volume de água a aplicar em até 20 L, considerando o volume de aplicação de lâmina líquida de água na zona radicular da cultura, para a camada 0-0,5 m, e assumido um fator de molhamento de 0,3, utilizados como referência na determinação do turno de rega a partir do volume de água condizente com a capacidade de armazenamento de água na área molhada por planta, o que resultou na frequência de irrigação de três irrigações por semana e com duração máxima de 13 minutos cada.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, esquema fatorial $(3 \times 3) + 1$, com quatro repetições e as parcelas experimentais constituídas por uma fileira de seis plantas, sendo consideradas úteis as três plantas centrais e as marginais utilizadas como bordaduras (Figura 1). Os tratamentos consistiram da combinação de três lâminas de irrigação, determinada pela evapotranspiração da cultura - ET_c ($L_1 = 33\%$; $L_2=66\%$ e $L_3= 100\%$ da ET_c) e três níveis de salinidade da água de irrigação pela condutividade elétrica - CEa ($S_1=0,5$; $S_2=2,5$ e $S_3=4,5$ dS m⁻¹), mais um tratamento controle (T0), o qual a irrigação foi suspensa após 60 DAT.

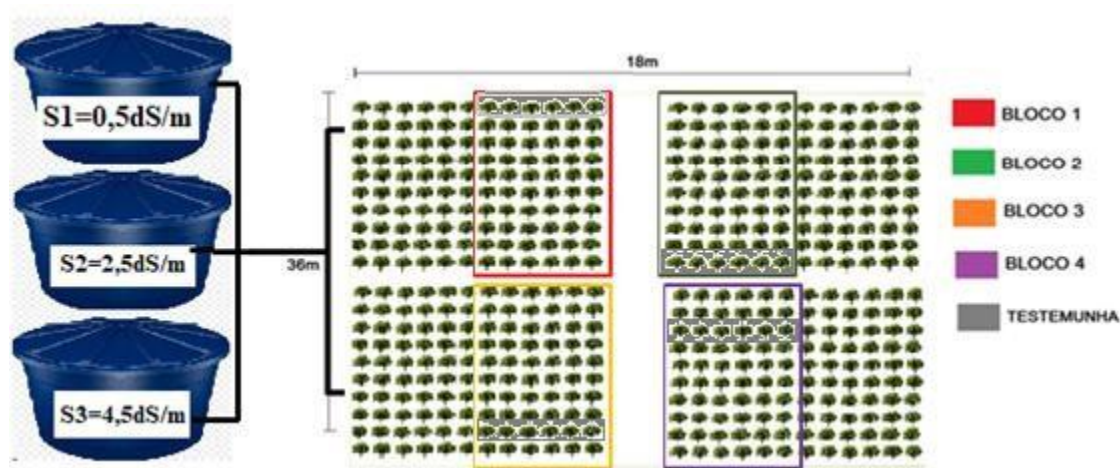


Figura 1. Croquis da área experimental com a disposição das parcelas e respectivos tratamentos.

As sementes foram colhidas de plantas matrizes localizadas no campus Leste da UFERSA e plantadas uma semente por célula em bandejas de polietileno de 200 células. Utilizou-se como

substrato mistura de 50% dos substratos comerciais Fibra de Coco® e Carolina®. O substrato Carolina continha na sua composição turfa, vermiculita, casca de arroz carbonizada, resíduo orgânico e NPK. A irrigação das bandejas foi realizada manualmente com água de abastecimento local ($CE = 0,5 \text{ dS m}^{-1}$), sendo a emergência iniciada 5 dias após a semeadura (DAS). O transplântio ocorreu aos 30 DAS, quando as mudas apresentaram altura de 0,20 m.

Na área experimental, antes do transplântio, realizou-se uma gradagem na camada de 0,20 m de profundidade do solo. Em seguida, foram realizadas aberturas das covas nas dimensões de $0,20 \times 0,20 \times 0,10 \text{ m}$ com espaçamento de $3,0 \times 1,5 \text{ m}$, seguida de transplântio de uma muda/cova. No momento do transplântio, foi realizada adubação de fundação com 50 g de MAP ($52\% \text{ P}_2\text{O}_5$ e $11\% \text{ N}$) por cova (Figura 2).

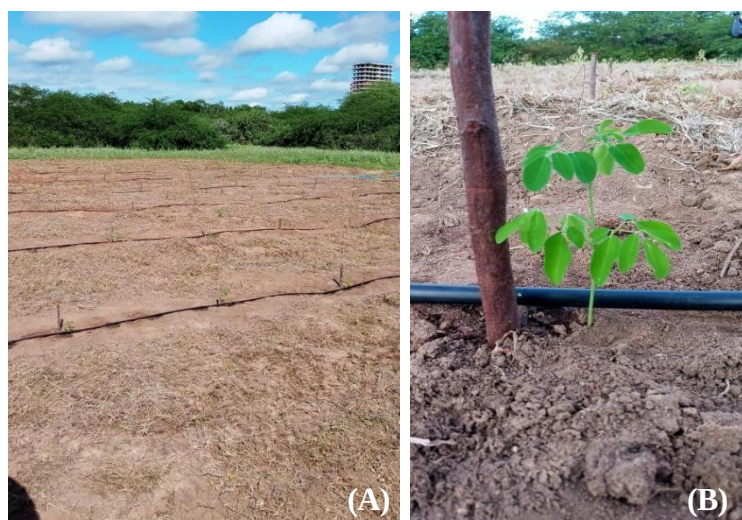


Figura 2. Implantação do sistema de irrigação: (A) demonstração da disposição das fitas gotejadoras de irrigação localizada antes do transplântio e (B) após o transplântio e antes da aplicação dos tratamentos

A partir dos 60 DAT, cessou-se a irrigação no tratamento testemunha (T0) e iniciou-se a diferenciação da irrigação por tratamento, utilizando-se irrigação localizada por microtubos como emissor, a partir da pressão de serviço calculada. Nos tratamentos com $100\%ET_c$ (L3), uso emissor com vazão 90 L h^{-1} , enquanto para os tratamentos de déficit hídrico na proporção de

66%ETc (L1) e 33%ETc (L2) dimensionou-se emissores de 30 L h⁻¹ e utilizou 2 ou um por planta, respectivamente.

A vazão nominal de cada tratamento foi estabelecida mediante dimensionamento hidráulico do sistema de irrigação para atender as distintas vazões. Dessa forma, as linhas laterais foram instaladas com mangueiras de diâmetros de 14 mm (L1) e 16 mm (L2). A regulação da vazão/emissor em cada tratamento foi realizada pela combinação do número, comprimento e diâmetro dos microtubos: L1 foi equipado com um emissor de 1,5mm; L2 com dois emissores de 1,5mm e L3 = um emissor de 3,0 mm. O comprimento de cada microtubo foi determinado pela Eq. 1, considerando o fluxo turbulento. Conforme metodologia proposta por Souza; Botrel (2004) e Frizzone et al. (2012), como demonstrado na Figura 3.

$$L = 2,237 \left(\frac{H \cdot d^{4,75}}{q^{1,75}} \right) - 0,01427 q^{0,25} d^{0,75} \left(1,27 \ln \frac{q}{d} + 0,1 \right) \quad \text{Eq. 1}$$

Em que

L – Comprimento do microtubo (m);

H – Carga hidráulica, que é a pressão na entrada do microtubo, considerando que a saída do microtubo está no mesmo plano da entrada (m);

d – Diâmetro interno do microtubo (mm);

q – Vazão do microtubo, em (L h⁻¹).

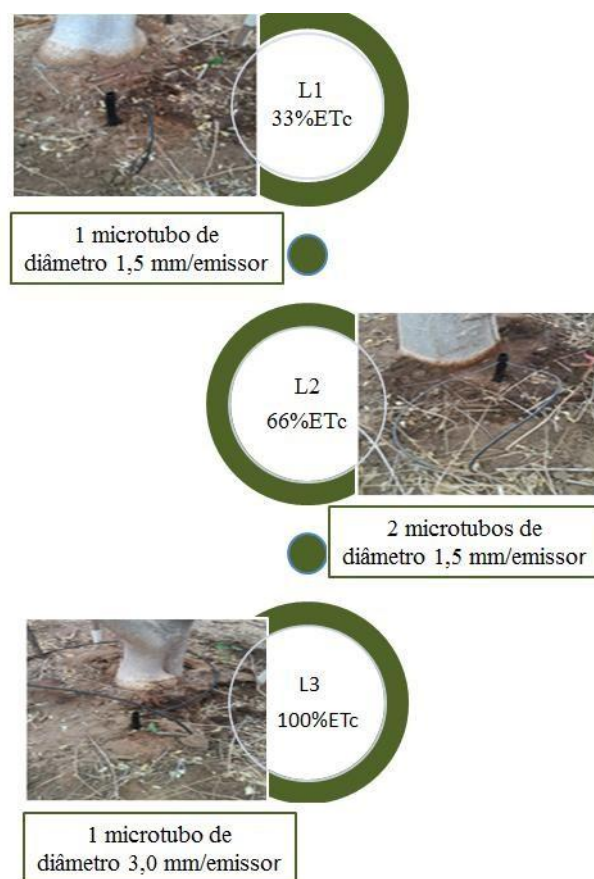


Figura 3. Disposição dos microtubos próximo ao caule e dentro dos sulcos, demonstrando diferentes diâmetros e comprimentos de mangueiras calculados de acordo com a vazão de cada planta.

A água de irrigação não salina ($0,5 \text{ dS m}^{-1}$) foi proveniente da água de abastecimento Companhia de Águas e Esgoto do Rio Grande do Norte (CAERN), no município de Mossoró-RN. As águas salinas ($2,5 \text{ dS m}^{-1}$ e $4,5 \text{ dS m}^{-1}$) originaram-se de diluição de NaCl (155 g L^{-1}), $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (625 g L^{-1}) e água-mãe com concentração de 29° Baumé ($\text{Mg}^{2+} = 54,30 \text{ g L}^{-1}$, $\text{Na}^+ = 48,82 \text{ g L}^{-1}$ e $\text{K}^+ = 14,89 \text{ g L}^{-1}$) em água não salina de modo a obter uma proporção molar de cargas de 7:2:1 (Na:Ca:Mg), de acordo com a metodologia de Medeiros (1992), para a composição média das águas salobras utilizadas para irrigação no semiárido nordestino. As águas preparadas tiveram aferição da CEa com condutivímetro de bancada digital CD-820 (Instrutherm, São Paulo, Brasil) e sua composição química final determinada é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Composição química das águas utilizadas na irrigação das moringas em cada tratamento

Águas	pH	CE	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻
		dS m ⁻¹	-----g L ⁻¹ -----					
S1	6,5	0,5	2,5	1,5	1,0	1,3	0,2	3,5
S2	6,7	2,5	12,5	6,5	3,5	15,0	1,0	6,5
S3	6,8	4,5	25,0	13,0	7,0	37,0	2,0	6,0

A proporção de sais na água avaliou aspectos de qualidade das águas do aquífero Jandaíra, cuja ocorrência abrange zonas recobertas pela Formação Barreiras, aluviões e dunas no Estado do Rio Grande do Norte (RN). Conforme estudos regionais conduzidos pela Secretaria de Recurso Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte, os parâmetros de qualidade desta água indicaram pH variando de 6,50 a 8,10, obtendo a média de 7,49, classificando-as como neutras a alcalinas. Evidenciaram também, neste relatório, a predominância de águas cloretadas bicarbonadas cálcicas, com dureza variando entre 71,36 a 2.089,97 mg L⁻¹ de CaCO₃ e apresentando média de 717,02 mg L⁻¹; e sólidos totais dissolvidos entre 1.000 a 5.000 mg L⁻¹ e média de 1.756,25 mg L⁻¹ (Marcon; Martins; Stein, 2015).

Com a finalidade de otimizar a distribuição de água na zona radicular e maximizar a eficiência do uso, reduzindo perdas por evaporação ou escoamento superficial, manteve-se ao longo do ciclo da cultura a formação de sulcos de irrigação com configuração circular (diâmetro de 0,6 m), garantindo sua manutenção integrada aos tratamentos culturais convencionais, assegurando-se assim as condições adequadas para o pleno desenvolvimento das plantas, conforme ilustrado na Figura 4.



Figura 4. Formação de sulcos circulares com a finalidade de contenção da água de irrigação na zona radicular das plantas.

Os dados meteorológicos diários de temperatura média do ar (T_{med} , °C), evapotranspiração de referência (E_{To} , mm dia⁻¹), radiação global (R_g , MJ m⁻² dia⁻¹) e umidade relativa do ar (UR, %) foram monitorados ao longo do período experimental. O registro foi realizado por meio de uma estação meteorológica automática instalada na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) e os dados coletados estão descritos na figura 6.

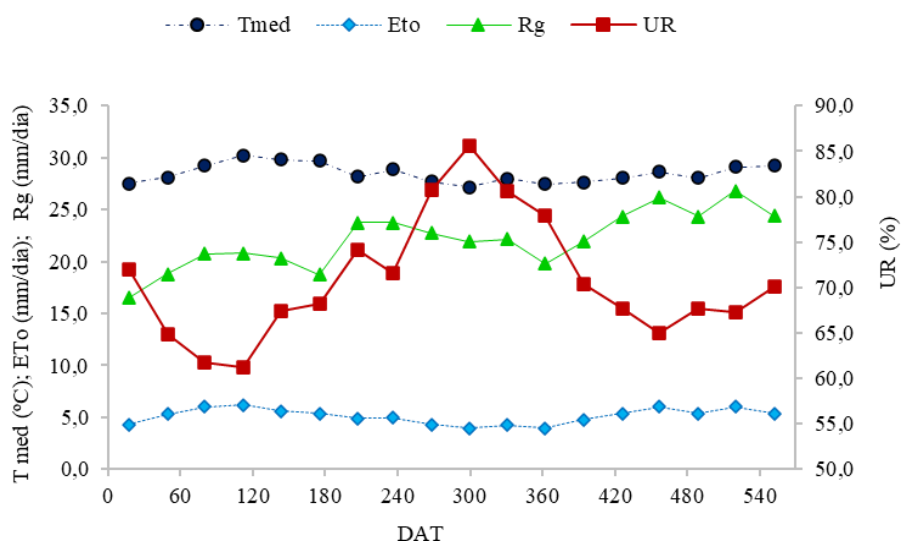


Figura 5. Temperatura média (T_{med}), Evapotranspiração de referência (E_{To}), Radiação global (R_g) e Umidade relativa do ar (UR) coletados na Estação Meteorológica da UFERSA durante o período experimental.

A pré-irrigação, até 60DAT, foi de 46mm de água. A aplicação dos tratamentos aconteceu em dois períodos de estiagem na região, sendo o primeiro de 60DAT a 221DAT, totalizando aplicação de água na irrigação: L1= 107,6; L2=215,2 e L3=322,9 mm, e o segundo entre 370DT a 555DAT, totalizando L1= 156,9; L2=266 e L3=376 mm até o último corte aos 555DAT, sendo aplicado durante todo o período experimental, L1=264,5; L2= 481,2 e L3= 698,9 mm de água na irrigação/tratamento, como mostrado na Figura 6. Não houve necessidade de irrigação artificial dos tratamentos durante o período chuvoso – 222DAT a 373DAT, contabilizando-se 568,29 mm de precipitação pluvial efetiva acumulada (Figura 6).

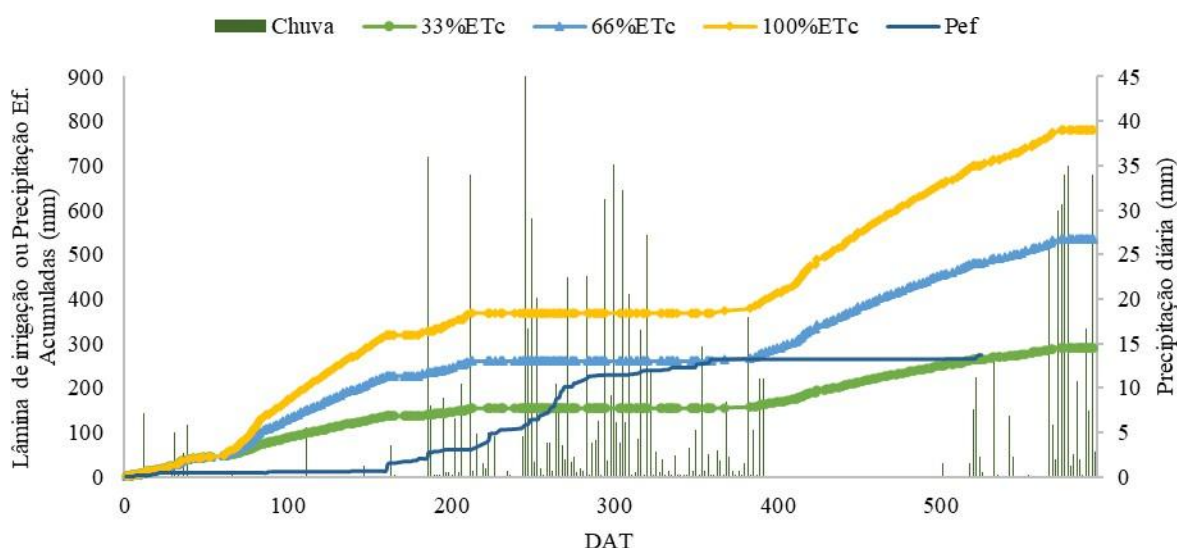


Figura 6. Lâmina de irrigação e precipitação diária durante o experimento

As avaliações biométricas ocorreram aos 90; 150; 210; 270; 345; 435; 495 e 555 DAT, iniciadas quando as plantas apresentaram 1,2 m de altura, sendo submetidas a cortes apicais na altura de 0,8 m, favorecendo a ramificação lateral e produção de biomassa da planta. Os intervalos de cortes foram estabelecidos em 60 dias, conforme metodologia recomendada por (Sobral; Muniz; Silva, 2020), antecidos de avaliações biométricas de altura da planta (AP), diâmetro do caule (DC), peso da massa verde (MV) e determinação de massa seca (MS).

A altura de planta (AP) foi mensurada pela distância entre a superfície do solo até a gema apical, utilizando-se uma fita métrica. A determinação do diâmetro caulinar (DC), em milímetros, realizou-se a partir de leitura direta de com paquímetro digital resolução 0,1 mm Modelo MTX 6 POL (150mm), entre 0,05 e 0,2 m do solo, conforme a idade da planta (Oliveira Junior *et al.*, 2021). A partir de 150 mm, utilizou-se a medida do perímetro do caule com fita métrica e conversão em diâmetro, em milímetros, através da Eq. 2:

$$C = \pi \times D \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

C = Perímetro;

$\pi = 3,1416$;

D = Diâmetro.

A massa verde (MV) foi determinada mediante corte dos ramos a 1,10 m de altura com o auxílio de motosserra de poda portátil, seguido de pesagem imediata em balança digital de gancho com capacidade para 50 kg. Posteriormente à pesagem, o material de todas as parcelas foi triturado com auxílio de máquina forrageira. Amostras representativas do material triturado foram acondicionadas em sacos de papel “kraft” e submetidas à secagem em estufa de ventilação forçada (Modelo TE-394/2-MP, Tecnal®, Brasil) a 65 ± 2 °C até massa constante, por um período mínimo de 72 horas. O teor de matéria seca (MS) foi determinado pelo método gravimétrico, calculada pela diferença de massa antes e após o processo de secagem. A produtividade de matéria seca foi calculada a partir da biomassa fresca multiplicado pelo teor de MS e convertido em produção por hectare, considerando uma densidade de 2.222 plantas/ha.

Os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) pelo teste de F ($p \leq 0,05$), conforme descrito por Banzato e Kronka (2013). As médias referentes aos tratamentos das lâminas de irrigação e da salinidade da água foram comparadas com o tratamento testemunha pelo teste

Dunnet ($p \leq 0,05$), enquanto as médias entre Lâminas ou níveis de sais nas águas ou aplicação de sais foram comparadas pelo Teste Tukey ($p \leq 0,05$).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Não houve interação significativa ($p > 0,05$) entre salinidade $\times$ lâminas de irrigação ou entre os fatores isolados para a variável altura da planta nos períodos de avaliação (Tabela 3). No entanto, houve efeito da interação entre tratamentos irrigados e o controle aos 150 e 210DAT, indicando a superioridade da irrigação para o crescimento e desenvolvimento da planta até a salinidade de $4,5 \text{ dS m}^{-1}$ e a partir de 33%ETc nestes períodos.

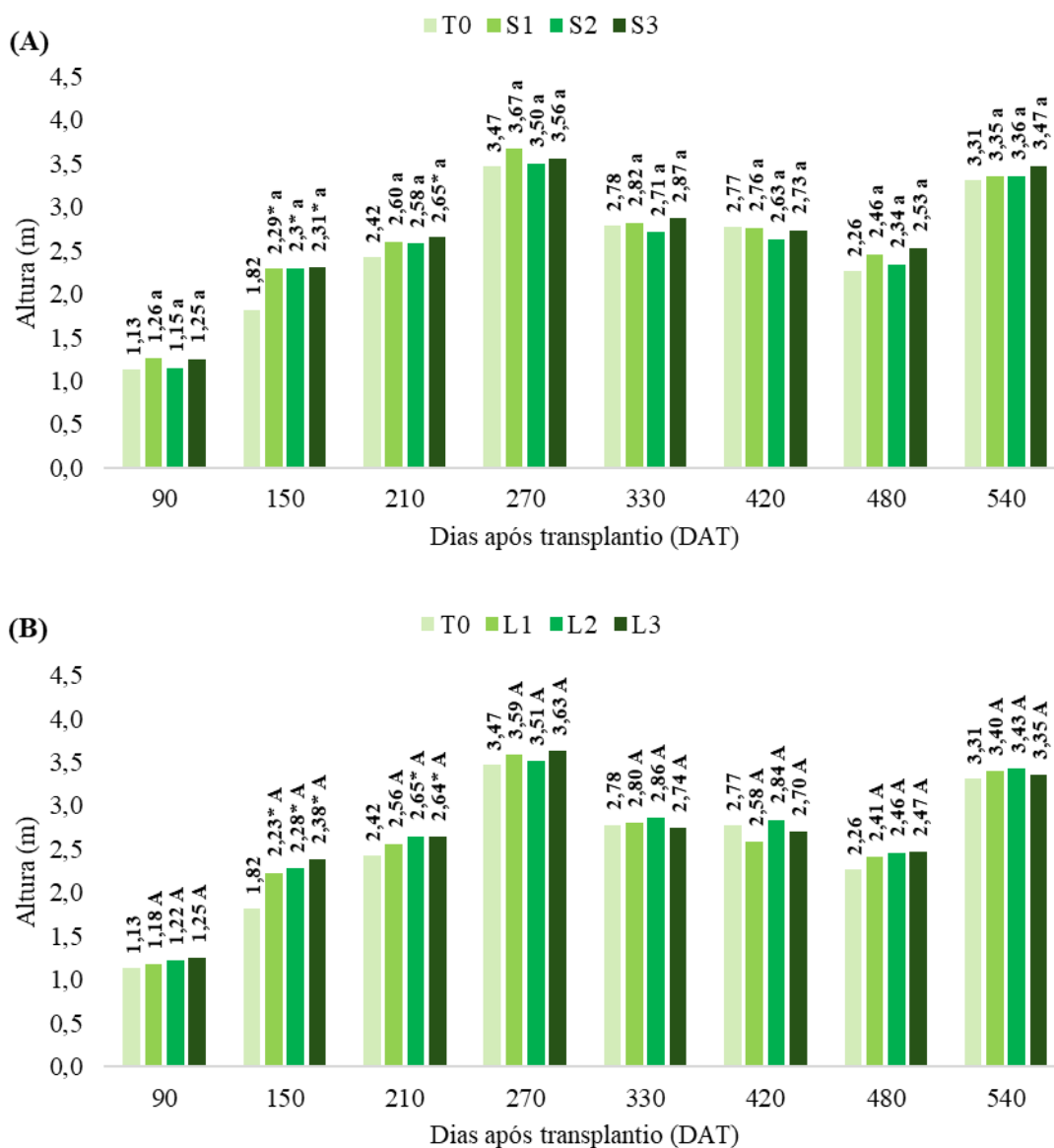
Tabela 3. Resultados de análise de variância para altura das plantas de moringa nos períodos de avaliação sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação no cultivo da moringa

FV	GL	Altura (m)							
		90	150	210	270	345	435	495	555
		----- DAT-----							
		Significância do teste F							
Fat × T0	1	0,569 ^{ns}	0,000**	0,029**	0,544 ^{ns}	0,875 ^{ns}	0,673 ^{ns}	0,196 ^{ns}	0,517 ^{ns}
Sal	2	0,539 ^{ns}	0,961 ^{ns}	0,635 ^{ns}	0,454 ^{ns}	0,334 ^{ns}	0,423 ^{ns}	0,223 ^{ns}	0,347 ^{ns}
Lam	2	0,813 ^{ns}	0,096 ^{ns}	0,346 ^{ns}	0,674 ^{ns}	0,508 ^{ns}	0,074 ^{ns}	0,838 ^{ns}	0,676 ^{ns}
Sal × Lam	4	0,772 ^{ns}	0,117 ^{ns}	0,322 ^{ns}	0,806 ^{ns}	0,357 ^{ns}	0,382 ^{ns}	0,563 ^{ns}	0,987 ^{ns}
DMS (Tukey)Sal ou Lam		28,15	16,99	16,30	33,26	26,86	27,00	25,87	23,81
DMS (Dunnet) T0 vs Sal ou Lam		37,46	22,61	21,69	44,26	35,74	35,93	34,42	31,68
DMS (Dunnett) T0 vs Trat		55,80	33,68	32,31	65,93	53,23	53,52	51,28	47,19
CV (%)		23,0	7,5	6,2	9,2	9,5	9,8	10,5	6,9
Médias		1,21	2,25	2,59	3,56	2,80	2,71	2,42	3,38

FV = Fator de variância, GL = DAT = Dias após a transplântio; Fat = Médias dos tratamentos irrigados; dms = diferença mínima significativa; CV = Coeficiente de variação; T0 = tratamento sem irrigação; ns = não significativo; * = significativo à 5% de probabilidade e ** = significativo à 1% de probabilidade.

Aos 150 DAT, todos os tratamentos irrigados apresentaram-se superiores ao não irrigado, com média de 2,30 m de altura, o equivale a um incremento médio de 26,4% de altura em relação aos tratamentos sem irrigação, sugerindo que a mínima irrigação influenciou positivamente na altura das plantas. Aos 210 DAT essa diferenciação foi diminuída, proporcionando aumento médio de 9,52% nos tratamentos de irrigação 66%ETc ou de salinidade $4,5 \text{ dS m}^{-1}$, e de 8,9% no

tratamento 100%ETc (Figura 7). A partir desta idade, não houve mais diferença significativa entre os tratamentos irrigados e estes com o controle, sugerindo que o aumento do fornecimento hídrico para moringa impacta positivamente na altura das plantas somente no desenvolvimento inicial da moringa.



*Diferença significativa em relação ao tratamento controle (T0) pelo teste de Dunnett à 5% de probabilidade. Letras minúsculas iguais não diferem entre si para os níveis de salinidade pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$), e letras maiúsculas iguais não diferem entre si as lâminas de irrigação pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

Figura 7. Altura das plantas de moringa nos períodos de avaliação sob níveis de salinidade da água de irrigação (A) e percentuais das lâminas de irrigação (B)

As avaliações aos 270 e 345 DAT representam o período chuvoso, sem aplicação dos tratamentos, demonstrando a capacidade de compensação das plantas não irrigadas a curto prazo quando submetido a irrigação constante. A similaridade das alturas das plantas em diferentes tratamentos (435; 495 e 555 DAT) após reinício de aplicação dos tratamentos, indica que a moringa submetida a escassez hídrica até 66%ETc manteve tolerância positiva ao estresse hídrico, mantendo seu crescimento aéreo sob condições de escassez de água.

A redução no crescimento vertical das plantas induzida pela salinidade é atribuída principalmente ao estresse osmótico e à toxicidade iônica, cuja intensidade deste efeito é modulada pela idade da planta e pelo nível de tolerância intrínseca de cada genótipo (Zhao *et al.*, 2020). No presente estudo, evidenciou-se que esses efeitos redutivos no desenvolvimento foram significativos até 150 DAT, corroborando a importância crítica da qualidade da água de irrigação para o desenvolvimento dos tecidos vegetais. Contudo, a partir dessa idade, observou-se que a otimização do manejo hídrico mitigou parcialmente esses danos, sugerindo a ativação de mecanismos de aclimação ou uma maior resiliência da planta em fases mais avançadas de maturação.

A Tabela 4 apresenta as análises de variância para o diâmetro do caule nos diferentes períodos de avaliação, que não apresentou diferença significativa para interação salinidade × lâminas de irrigação ou para efeito isolado de salinidade ($p > 0,05$) nos períodos avaliados, o que evidencia tolerância da moringa até 4,5 dS m⁻¹ em relação a sua fixação no solo.

No entanto, houve efeito significativo entre os fatores isolados (lâminas de irrigação e salinidade) e a testemunha (T0) para o diâmetro aos 150, 210 e 270 DAT. Nos períodos indicados, o diâmetro das plantas irrigadas diferiram significativamente ($p \leq 0,01$) do diâmetro das plantas controle (T0), apresentando incremento médio de 47,8; 35,9 e 17,03% a partir da disponibilidade hídrica de 33%ETc em relação ao T0, respectivamente, mostram que o diâmetro do caule da moringa responde positivamente ao aumento da lâmina de irrigação, especialmente sob sistemas

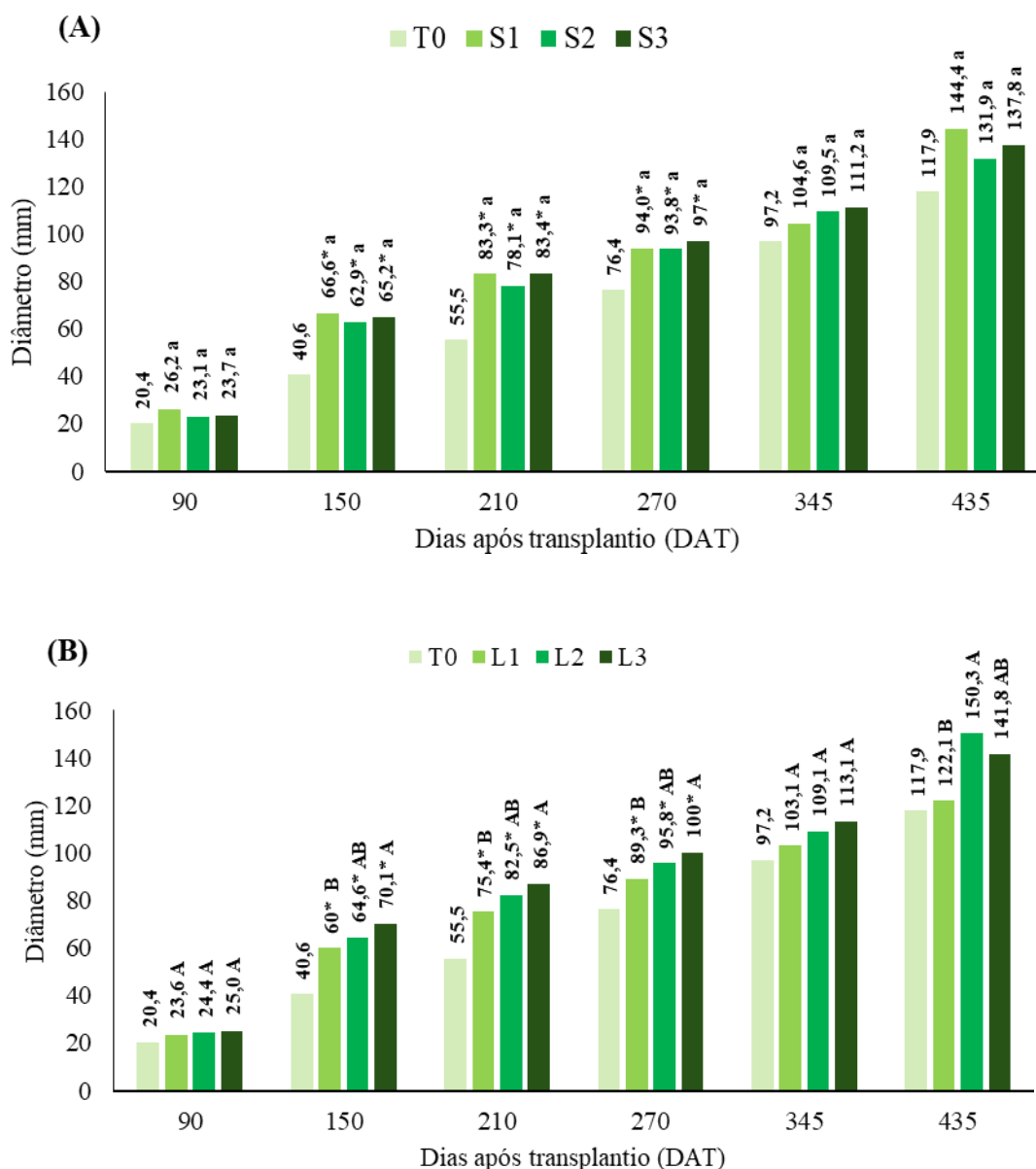
eficientes de irrigação localizada (Abou-Shlell; El-Emary; KHalifa, 2020; El-Boraie; El Shafay; Elhagarey, 2021), confirmando a influência direta da irrigação mínima de 33%ETc para fixação e capacidade de suporte da planta até 270 DAT.

Tabela 4. Resultados de análise de variância para diâmetro do caule de moringa nos períodos de avaliação sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação no cultivo da moringa

FV	GL	Diâmetro (mm)					
		90	150	210	270	345	435
		----- DAT -----					
Significância do teste F							
Fat × T0	1	0,144 ^{ns}	0,000**	0,000**	0,000**	0,095 ^{ns}	0,146 ^{ns}
Sal	2	0,301 ^{ns}	0,312 ^{ns}	0,140 ^{ns}	0,564 ^{ns}	0,405 ^{ns}	0,495 ^{ns}
Lam	2	0,776 ^{ns}	0,001**	0,002**	0,022**	0,156 ^{ns}	0,033 ^{ns}
Sal × Lam	4	0,978 ^{ns}	0,720 ^{ns}	0,229 ^{ns}	0,482 ^{ns}	0,232 ^{ns}	0,834 ^{ns}
DMS (Tukey)Sal ou Lam		5,03	5,99	7,32	9,06	12,54	25,83
DMS (Dunnet) T0 vs Sal ou Lam		6,69	7,96	9,73	12,06	16,68	34,37
DMS (Dunnett) T0 vs Trat		9,97	11,86	14,50	17,96	24,85	51,20
CV (%)		20,7	9,5	9,1	27,0	11,5	18,7
Médias		23,9	62,5	79,0	93,1	107,3	136,0

FV = Fator de variância, GL = DAT = Dias após a transplantio; Fat = Médias dos tratamentos irrigados; DMS = diferença mínima significativa; CV = Coeficiente de variação; T0 = tratamento sem irrigação; ns = não significativo; * = significativo à 5% de probabilidade e ** = significativo à 1% de probabilidade

Entre os tratamentos irrigados com diferentes lâminas de irrigação, ocorreu superioridade do diâmetro no caule no tratamento 100%ETc nas avaliações 150; 210 e 270 DAT, e em 435 DAT nos tratamentos 66 e 100%ETC. Aos 90 DAT não houve efeito dos tratamentos no diâmetro caulinar, com valor médio de 24,4 mm, demonstrando que 30 dias de aplicação dos tratamentos foi insuficiente para influenciar no diâmetro caulinar da moringa (Figura 8).



*Diferença significativa em relação ao tratamento controle (T0) pelo teste de Dunnett à 5% de probabilidade. Letras minúsculas iguais não diferem entre si para os níveis de salinidade pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$), e letras maiúsculas iguais não diferem entre si as lâminas de irrigação pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

Figura 8. Diâmetro caulinar de moringa nos períodos de avaliação sob níveis de salinidade da água de irrigação (A) e percentuais das lâminas de irrigação (B).

Ainda comparando o fator isolado lâmina de irrigação, a restrição hídrica até 33% (L2) contribuiu para redução do diâmetro caulinar na proporção de 14,4%; 10,9% e 10,7% nas avaliações 150; 210 e 270 DAT em relação a L3, demonstrando compensação nas demais avaliações no período de suspensão dos tratamentos devido presença de chuvas. No período de

avaliação 435 DAT, houve superioridade do diâmetro em L2 promovendo redução caulinar em 19,88% para L1.

Portanto, em todos os períodos avaliados com aplicação de tratamentos, o tratamento L1 apresentou diâmetro reduzido em relação as demais lâminas, demonstrando menor suscetibilidade a capacidade de suporte das plantas neste tratamento. Outras pesquisas indicaram tolerância da moringa a déficits hídricos moderados (até 20%) com maior sensibilidade nas primeiras semanas de cultivo, principalmente em sistemas de irrigação localizada por gotejamento superficial ou enterrado, devido a maior eficiência de uso água e sua menor evaporação (El-Gamal; Khamis, 2021; Sadak *et al.*, 2020).

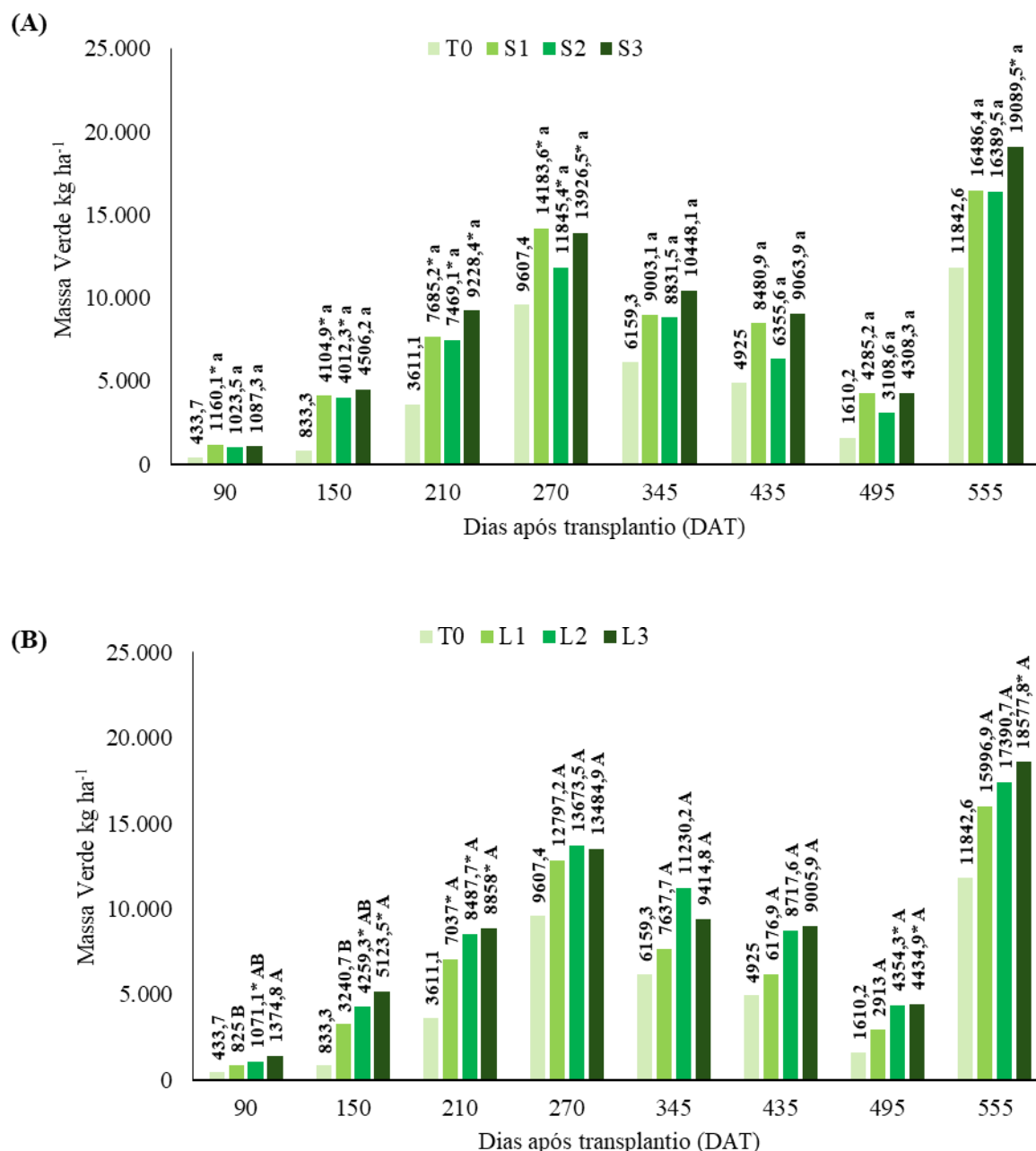
A Tabela 5 demonstra que não houve interação significativa ($p > 0,05$) entre salinidade $\times$ lâminas de irrigação para a variável a produção da massa verde nos períodos de avaliação. No entanto, houve efeito da interação entre tratamentos irrigados e o controle aos 90 DAT, onde a produção de biomassa aumentou em 267% no tratamento S1 e 317% em L3, em relação ao T0. Nos cortes de 150 e 210 DAT, todos os tratamentos irrigados apresentaram-se superiores ao controle, sendo seu incremento médio de 504 e 225% respectivamente.

Tabela 5. Resumo da análise de variância para massa seca da moringa nos períodos de avaliação sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação no cultivo da moringa

FV	GL	Massa verde (kg/ha)							
		90	150	210	270	345	435	495	555
----- DAT -----									
		Significância do teste F							
Fat × T0	1	0,019**	0,000**	0,001**	0,100 ^{ns}	0,137 ^{ns}	0,155 ^{ns}	0,042*	0,033*
Sal	2	0,801 ^{ns}	0,570 ^{ns}	0,170 ^{ns}	0,330 ^{ns}	0,567 ^{ns}	0,228 ^{ns}	0,273 ^{ns}	0,285 ^{ns}
Lam	2	0,040*	0,003**	0,168 ^{ns}	0,872 ^{ns}	0,113 ^{ns}	0,174 ^{ns}	0,139 ^{ns}	0,404 ^{ns}
Sal × Lam	4	0,904 ^{ns}	0,213 ^{ns}	0,382 ^{ns}	0,887 ^{ns}	0,618 ^{ns}	0,502 ^{ns}	0,603 ^{ns}	0,082 ^{ns}
DMS (Tukey)Sal ou Lam		507,27	1216,04	2445,42	4187,47	4095,77	4000,74	2062,62	4685,30
DMS (Dunnet) T0 vs Sal ou Lam		674,92	1617,92	3253,59	5571,37	5449,36	5322,92	2744,28	6233,71
DMS (Dunnett) T0 vs Trat		1005,372	2410,10	4846,63	8299,25	8117,50	7929,16	4087,96	9285,90
CV (%)		48,9	31,0	31,4	31,9	44,4	51,5	55,4	27,6
Médias		1024,6	3870,4	7675,9	12947,4	9100,7	7662,6	3671,1	16773,8

FV = Fator de variância, GL = Grau de liberdade, DAS = Dias após a semeadura; Fat = Medias dos tratamentos irrigados; DMS = diferença mínima significativa; CV = Coeficiente de variação; S= Salinidade da AP sintética; L= Lâmina de irrigação; T0 = tratamento sem irrigação; * Diferença significativa a 0,05 de probabilidade ** Diferença significativa a 0,01 de probabilidade; ns = Não há diferença significativa entre tratamentos.

O corte 495 DAT apresentou os tratamentos L2 e L3 superiores ao controle, evidenciando que a irrigação a partir de 66% influenciou positivamente na produção de biomassa, nas proporções de 170,4 e 175,3% respectivamente. Já no corte de 555DAT os tratamentos S3 e L3 proporcionaram produção de biomassa 61,2% e 56,9% a mais que o tratamento não irrigado (Figura 9).



*Diferença significativa em relação ao tratamento controle (T0) pelo teste de Dunnett à 5% de probabilidade. Letras minúsculas iguais não diferem entre si para os níveis de salinidade pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$), e letras maiúsculas iguais não diferem entre si as lâminas de irrigação pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

Figura 9. Produção de matéria verde/ha de moringa nos períodos de avaliação sob níveis de salinidade da água de irrigação (A) e percentuais de lâminas de irrigação (B)

Entre os tratamentos irrigados, o aumento do nível de salinidade na água de irrigação não afetou significativamente a produção de biomassa entre tratamentos, evidenciando a tolerância a moringa a 4,5 dS m⁻¹. Azeem *et al.* (2023) concluíram que a moringa oleífera gerencia efetivamente a salinidade moderada, modulando atributos fisiológicos e bioquímicos para supressão do estresse oxidativo oriundo da salinidade, aumentando o teor de compostos antioxidantes, incluindo ácido ascórbico, glutathione, fenóis totais e flavonoides, mitigando os efeitos negativos da salinidade e melhorando sua eficiência do uso da água e sua produtividade.

Avaliando as lâminas de irrigação aplicadas, verificou-se aumento de biomassa no tratamento de L3 de 66 e 58% em relação a produção de L1, nas avaliações 90 e 150 DAT, respectivamente, e similar a produtividade de L2, o que evidencia ser suficiente a disponibilidade hídrica a partir de 66%E_{Tc} para o crescimento da planta e produção de biomassa. Dessa forma, é possível economizar até 33% de água de irrigação sem comprometer a produtividade da planta, sendo recomendado seu cultivo em regiões com recursos hídricos limitados (Azam *et al.*, 2020; Bekka *et al.*, 2022).

A Tabela 6 demonstra que não houve interação significativa ($p > 0,05$) entre salinidade × lâminas de irrigação para a variável a produção da massa seca nos períodos de avaliação. No entanto, houve efeito da interação entre tratamentos irrigados e o controle aos 90 DAT, onde a produção de biomassa aumentou em 160% no tratamento S1 e 222% em L3, em relação ao T0. Nos cortes de 150 e 210 DAT, todos os tratamentos irrigados apresentaram-se superiores ao controle, sendo seu incremento médio de 77,58 e 76,87% respectivamente.

Tabela 6. Resumo da análise de variância para massa seca da moringa nos períodos de avaliação sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação no cultivo da moringa

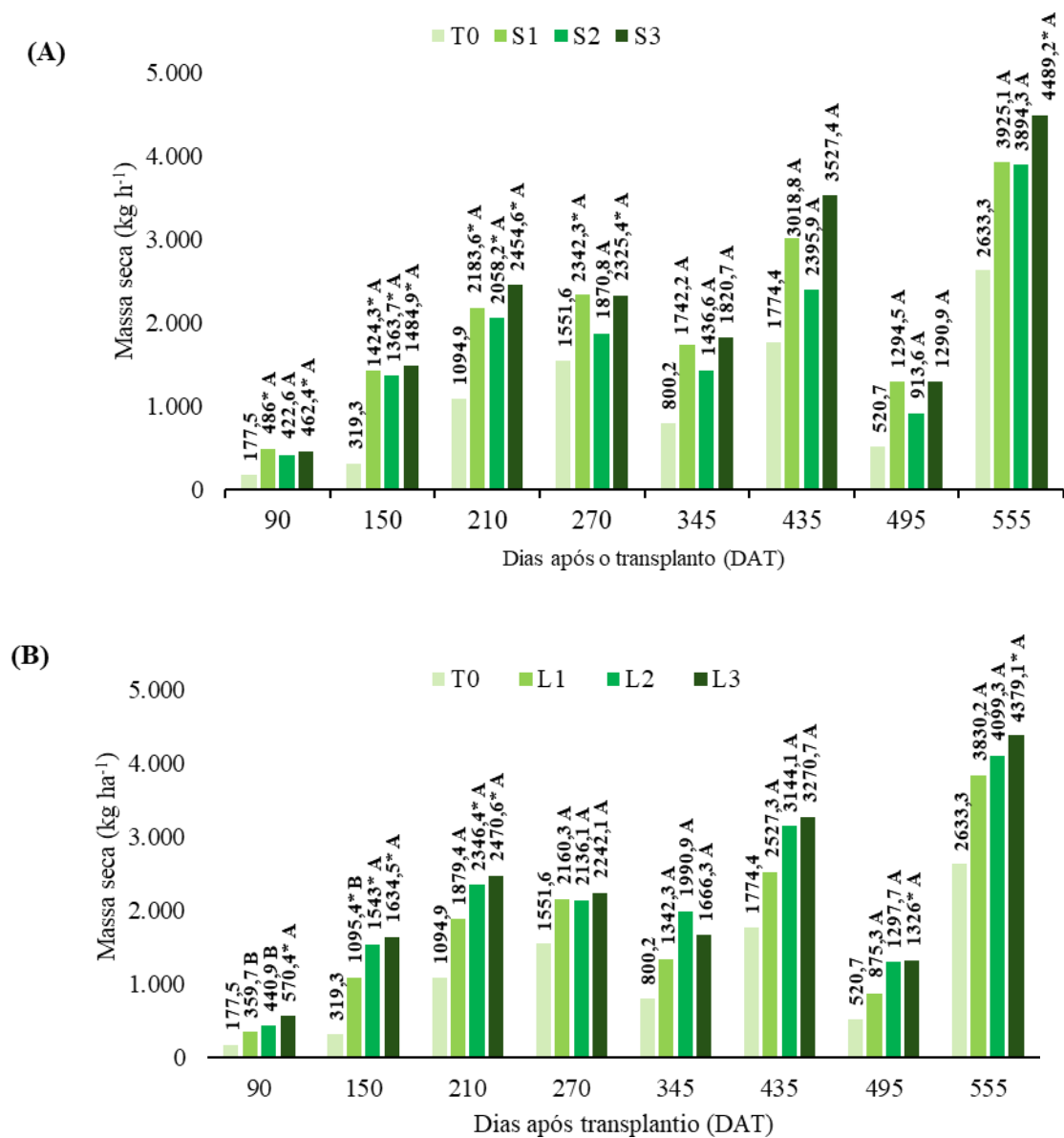
FV	GL	Massa seca (kg ha ⁻¹)							
		90	150	210	270	345	435	495	555
	----- DAT -----								
		Significância do teste F							
Fat × T0	1	0,014*	0,000**	0,003**	0,137 ^{ns}	0,064 ^{ns}	0,146 ^{ns}	0,054 ^{ns}	0,022*
Sal	2	0,741 ^{ns}	0,734 ^{ns}	0,337 ^{ns}	0,260 ^{ns}	0,514 ^{ns}	0,212 ^{ns}	0,229 ^{ns}	0,374 ^{ns}
Lam	2	0,050*	0,003**	0,087 ^{ns}	0,941 ^{ns}	0,194 ^{ns}	0,455 ^{ns}	0,146 ^{ns}	0,513 ^{ns}
Sal × Lam	4	0,755 ^{ns}	0,197 ^{ns}	0,450 ^{ns}	0,887 ^{ns}	0,484 ^{ns}	0,179 ^{ns}	0,607 ^{ns}	0,110 ^{ns}
DMS (Tukey)Sal ou Lam		204,60	380,69	668,67	788,59	862,18	1550,42	615,73	1164,60
DMS (Dunnet) T0 vs Sal ou Lam		272,21	506,50	889,65	1049,20	1147,12	2062,81	819,22	1549,49
DMS (Dunnett) T0 vs Trat		405,50	754,50	1325,25	1562,92	1708,77	3072,82	1220,34	2308,16
CV (%)		47,1	27,6	31,2	36,8	53,9	53,5	55,2	29,1
Médias		429,0	1313,8	2118,4	2116,7	1579,9	2860,1	1101,8	3955,98

FV = Fator de variância, GL = Grau de liberdade, DAS = Dias após a semeadura; Fat = Médias dos tratamentos irrigados; dms = diferença mínima significativa; CV = Coeficiente de variação; S= Salinidade da AP sintética; L= Lâmina de irrigação; T0 = tratamento sem irrigação; * Diferença significativa a 0,05 de probabilidade ** Diferença significativa a 0,01 de probabilidade, ns = não há diferença significativa entre tratamentos.

O corte 555 DAT apresentou superioridade na produção de matéria seca (MS) nos tratamentos S3, produzindo 70,47% a mais de MS seca que o tratamento não irrigado, confirmando a tolerância da moringa. A MS é um dos principais parâmetros para descrever o crescimento e o rendimento das plantas, estando diretamente relacionada ao aumento de variáveis biométricas (altura, diâmetro, biomassa), considerada um parâmetro importante para avaliar seu desenvolvimento e a produtividade (Chrisostomo *et al.*, 2022; Patidar *et al.*, 2020), a superioridade de S3 em alguns cortes e a similaridade nas demais avaliações demonstram, mais uma vez, a tolerância desta planta a salinidade de 4,5 dS m⁻¹.

Entre os tratamentos irrigados, verificou-se aumento de biomassa seca no tratamento L3 de 58,57 e 49,21% em relação a produção de L1, nas avaliações 90 e 150 DAT, respectivamente, havendo similaridade dos tratamentos L2 e L3 na segunda avaliação, enquanto, nas demais avaliações, não houve diferença significativa entre as lâminas de irrigação para MS, sugerindo que a produção de biomassa seca é exigente de água no início do seu desenvolvimento, permitindo a irrigação deficitária 33%ETc (L2) com o amadurecimento da planta.

Estes dados demonstram sua adaptabilidade a condições adversas e evidenciam a necessidade de disponibilidade hídrica a partir de 66% seu crescimento e produção. O manejo de irrigação controlado contribuiu para a alta produtividade e qualidade nutricional, tornando a moringa uma excelente opção de forragem e suplementação alimentar (Zheng; Zhang; Wu, 2016).



*Diferença significativa em relação ao tratamento controle (T0) pelo teste de Dunnett à 5% de probabilidade. Letras minúsculas iguais não diferem entre si para os níveis de salinidade pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$), e letras maiúsculas iguais não diferem entre si as lâminas de irrigação pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

Figura 10. Produção de matéria seca de moringa nos períodos de avaliação sob níveis de salinidade da água de irrigação (A) e lâminas de irrigação (B)

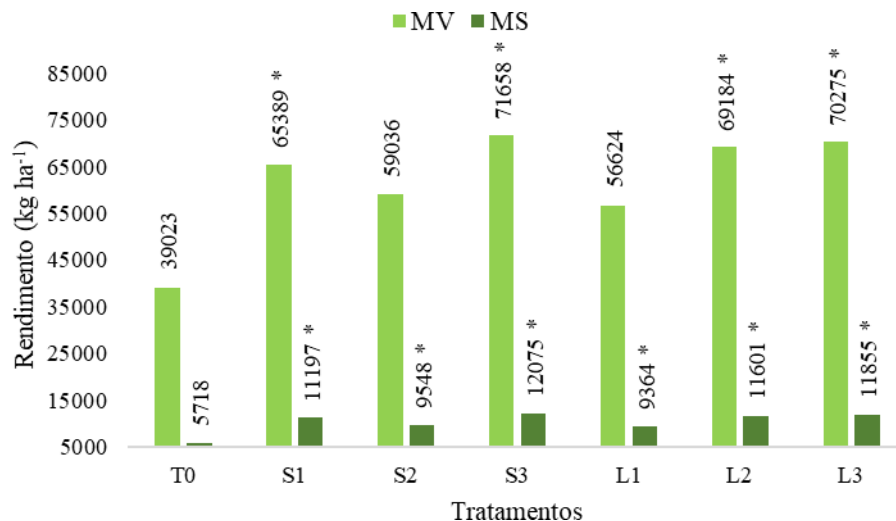
Relacionou-se também a produção total de matéria verde (MV) e matéria seca (MS) durante todo período experimental, verificando que não houve interação significativa ($p > 0,05$) entre salinidade $\times$ lâminas de irrigação, ou entre os fatores isolados, no rendimento total produzido dos 8 cortes avaliados, como detalhado na Tabela 7.

Tabela 7. Resumo da análise de variância (Significância do teste F) para massa fresca e seca (ramos com folhas) de moringa até 555 DAT, em 8 cortes, sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação.

FV	GL	MV	MS
Fat $\times$ T0	1	0,004**	0,001**
Sal	2	0,172 ^{ns}	0,079 ^{ns}
Lam	2	0,084 ^{ns}	0,057 ^{ns}
Sal $\times$ Lam	4	0,686 ^{ns}	0,823 ^{ns}
Dms (Tukey) Sal ou Lam		16157,86	2694,28
Dms (Dunnet) T0 vs Sal ou Lam		21497,77	3584,70
dms (Dunnett) T0 vs Trat		32023,63	5339,85
CV (%)		25,4	25,6
Médias		62727,2	18046,1

FV = Fator de variância, GL = Grau de liberdade, Fat = Medias dos tratamentos irrigados; dms = diferença mínima significativa; CV = Coeficiente de variação; Sal= Salinidade da água de irrigação; Lam= Lâmina de irrigação; T0 = tratamento sem irrigação; * Diferença significativa a 0,05 de probabilidade ** Diferença significativa a 0,01 de probabilidade; ns = não há diferença significativa entre tratamentos.

No entanto, houve interação entre tratamentos irrigados e o sem irrigação, onde a produção de biomassa fresca apresentou-se superior ($p < 0,01$) nos tratamentos S1; S3; L2 e L3, portanto é satisfatória a irrigação a partir de 66%ETc, utilizando água adicionada de sais até a concentração de 4,5 dS m⁻¹, sem interferir na produtividade de MV (folhas+ caule) da planta. Em relação a matéria seca (MS), a superioridade da produção se deu em todos os tratamentos irrigados, considerando viável irrigação deficitária a partir de 33%ETc com água salobra até 4,5dS m⁻¹ para aumentar o rendimento de MS (Figura 11).



*Diferença significativa em relação ao tratamento controle (T0) pelo teste de Dunnett à 5% de probabilidade.

Figura 11. Rendimento de massa verde (MV) e massa seca (MS) de moringa acumulado durante o período experimental (até 555DAT) no tratamento testemunha (T0), níveis de salinidade da água de irrigação (S1; S2; S3) e lâminas de irrigação (L1; L2; L3)

Portanto, a moringa cultivada com recursos hídricos limitados mostrou alta capacidade de recuperação após estresse induzido, quando houve disponibilidade hídrica adequada (período chuvoso). Seu potencial produtivo de folha+caule com irrigação complementar a partir de 66% da ETc a qualifica como uma alternativa sustentável para a segurança alimentar e a sustentabilidade agrícola, representando uma alternativa sustentável promissora para os sistemas agrícolas da região semiárida.

4. CONCLUSÕES

A moringa demonstrou-se altamente resiliente à restrição hídrica até 66%ETc e tolerante à salinidade da água de irrigação de até 4,5 dS m⁻¹ em condições semiáridas. A irrigação complementar a partir de 33%ETc foi suficiente para favorecer o desenvolvimento inicial da cultura até 150DAT, enquanto foi necessária aumentar a disponibilidade hídrica a partir de 66%ETc para maximizar o rendimento de biomassa fresca e pelo menos 33%ETc para biomassa seca.

REFERÊNCIAS

- ABOU-SHLELL, M.; EL-EMARY, F.; KHALIFA, A. Effect of nanoparticle on growth, biochemical and anatomical characteristics of moringa plant (*Moringa oleifera* L.) under salinity stress condition. **Archives of Agriculture Sciences Journal**, [s. l.], v. 0, n. 0, p. 186–213, 2020.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, [s. l.], p. 711–728, 2013.
- AZAM, S. *et al.* Adaptability of *Moringa oleifera* Lam. under different water holding capacities. **South African Journal of Botany**, [s. l.], v. 129, p. 299–303, 2020.
- AZEEM, M. *et al.* Salinity stress improves antioxidant potential by modulating physio-biochemical responses in *Moringa oleifera* Lam. **Springer Science and Business Media LLC**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 1–17, 2023.
- BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. do N. **Experimentação Agrícola**. 4. ed. Brasil: Funep, 2013. Disponível em: <https://livraria.funep.org.br/product/experimentac-o-agricola-4-edic-o/>.
- BEKKA, S. *et al.* Adaptation strategies of *Moringa oleifera* under drought and salinity stresses. **Ukrainian Journal of Ecology**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 8–16, 2022.
- BOUMENJEL, A.; PAPADOPOULOS, A.; AMMARI, Y. Growth response of *Moringa oleifera* (Lam) to water stress and to arid bioclimatic conditions. **Agroforestry Systems**, [s. l.], v. 95, n. 5, p. 823–833, 2021.
- CHAVES, J. T. L. *et al.* Differential composition of reserves and oil of *Moringa oleifera* seeds cultivated in states of Northeast Brazil. *Ciência e Agrotecnologia*. **Ciência e Agrotecnologia**, [s. l.], v. 47, n. 1, p. 1–9, 2023.
- CHRISOSTOMO, P. H. B. *et al.* Biometric evaluation and nutrients of the corn, pearl millet, and sorghum crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 57, p. e02907, 2022.
- DU, Y. *et al.* Drip irrigation in agricultural saline-alkali land controls soil salinity and improves crop yield: Evidence from a global meta-analysis. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 880, p. 163226, 2023.
- EL-BORAIE, F. M.; EL SHAFAY, R. M. M.; ELHAGAREY, M. E. Morphological and chemical characterizes responses of moringa oleifera yield to localized irrigation systems, water restriction and fertilizers. **International Journal of Advanced Research**, [s. l.], v. 9, n. 02, p. 509–523, 2021.
- EL-GAMAL, A.; KHAMIS, M. H. Impact of organic matter on the growth of jatropha curcas and moringa oleifera seedlings beneath water deficit. **Scientific Journal of Flowers and Ornamental Plants**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 427–446, 2021.
- FRIZZONE, J. A. *et al.* **Microirrigação: Gotejamento e Microaspersão**. Maringá: EDUEM, 2012.
- GHARSALLAH, K. *et al.* *Moringa oleifera*: Processing, phytochemical composition, and industrial applications. **South African Journal of Botany**, [s. l.], v. 160, p. 180–193, 2023.

GOBEZIE, E. Supplementation of Moringa oleifera Leaf Meal in Layer Chickens' Feed: A Review. **World's Veterinary Journal**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 202–207, 2021.

JIKAH, A. N.; EDO, G. I. Moringa oleifera: its industrial and pharmaceutical applications. A review. **Vegetos**, [s. l.], v. 37, n. 5, p. 1679–1689, 2024.

LUCENA, A. *et al.* Cultivation and Nutritional Quality of Moringa Oleifera Lam. Produced Under Different Substrates in Semi-Arid Region in Northeast Brazil. **Current Research in Agricultural Sciences**, [s. l.], v. 8, 2021.

MAHAVEERCHAND, H.; ABDUL SALAM, A. A. Environmental, industrial, and health benefits of Moringa oleifera. **Phytochemistry Reviews**, [s. l.], v. 23, n. 5, p. 1497–1556, 2024.

MARCON, A. E.; MARTINS, C. A.; STEIN, P. Caracterização das águas subterrâneas do aquífero jandaíra em subsídio ao programa água doce no Rio Grande do Norte (PAD/RN) | Águas Subterrâneas. **Águas Subterrâneas**, [s. l.], 2015. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28357>. Acesso em: 21 maio 2025.

MEDEIROS, J. F. **Qualidade da água de irrigação e evolução da salinidade nas propriedades assistidas pelo “GAT” nos Estados do RN, PB e CE.** 1992. 196 f. Dissertação - Universidade Federal da Paraíba - Campus II - Campina Grande, Campina Grande, 1992. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/jspui/handle/riufcg/2896>. Acesso em: 1 ago. 2025.

OLIVEIRA JUNIOR, V. M. D. *et al.* Crescimento vegetativo da moringa em distintos regimes de irrigação associados a composições de diferentes substratos. **IRRIGA**, [s. l.], v. 1, n. 4, p. 646–652, 2021.

PATIDAR, G. *et al.* Effect of fertigation on biometric characters, dry matter and quality of brinjal. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 1340–1346, 2020.

RICHARDS, L. A. **The diagnosis and improvement of saline and alkali soils.** Washington: U. S. Dept. Of Agriculture, 1969.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5a edição. Brasília-DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1094003>. Acesso em: 22 abr. 2021.

SAUCEDO-POMPA, S. *et al.* Moringa plants: Bioactive compounds and promising applications in food products. **Food Research International**, [s. l.], v. 111, p. 438–450, 2018.

SADAK, M. Sh. *et al.* Role of melatonin in improving growth, yield quantity and quality of Moringa oleifera L. plant under drought stress. **Bulletin of the National Research Centre**, [s. l.], v. 44, n. 1, p. 18, 2020.

SOBRAL, A. J. S.; MUNIZ, E. N.; SILVA, C. M. Caracterização da Moringa oleifera Lam e sua utilização na alimentação animal. **Ciência Animal**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 68–79, 2020.

SOUZA, R. O. R. M.; BOTREL, A. T. Modelagem para o dimensionamento de microtubos em irrigação localizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 16–22, 2004.

VÁSQUEZ, J. V. A. *et al.* Moringa leaf meal in diets of slow-growing chickens on metabolizability, performance, carcass, organ biometry and meat colorimetry. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, [s. l.], v. 25, p. e20230035, 2024.

ZHENG, Y.; ZHANG, Y.; WU, J. Yield and quality of *Moringa oleifera* under different planting densities and cutting heights in southwest China. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 91, p. 88–96, 2016.

ZHAO, J. *et al.* Does crop rotation yield more in China? A meta-analysis. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 245, p. 107659, 2020

CAPÍTULO III

POTENCIALIDADE DA MORINGA SUBMETIDA A ESTRESSES ABIÓTICOS: ALTERNATIVA DE FORRAGEM PARA RUMINANTES NO SEMIÁRIDO

RESUMO: Objetivou-se determinar o teor de nutrientes da Moringa oleífera cultivada em condições semiáridas e avaliar os efeitos da salinidade da água de irrigação até 4,5 dS m⁻¹ e da irrigação deficitária até 33% da necessidade hídrica na sua composição química, visando ponderar sua utilização como recurso forrageiro estratégico para a alimentação de ruminantes no semiárido brasileiro. O experimento foi conduzido em área experimental de 0,3ha, situada na Universidade Federal do Semi-Árido, município de Mossoró-RN-Brasil entre julho/2022 e março/2024. Utilizou-se delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial 3x3+1, com quatro repetições. Os fatores foram três níveis de salinidade da água de irrigação (S1=0,5; S2=2,5; S3=4,5 dS m⁻¹) e três lâminas de irrigação baseadas na evapotranspiração da cultura - ETc (L1=33%; L2=66%; L3=100%), mais um tratamento controle sem irrigação (T0). As plantas foram podadas a cada 60 dias e analisou-se o teor de matéria seca (MS), proteína bruta (PB), carboidratos totais (CHT), extrato etéreo (EE) e matéria mineral (MM), fibra em detergente neutro (FDN) e ácido (FDA), lignina (LDA), hemicelulose (HEM), celulose (CEL). Os dados foram submetidos a análise de variância e teste de Tukey e de Dunnet. A composição centesimal da moringa sob irrigação plena (S1L3) apresentou valores médios de 21% MS, 12,8% PB, 41,4% FDN e 32,5% FDA. O déficit hídrico até 33% ETc e a salinidade até 4,5 dS m⁻¹ não diferiram significativamente os teores de MS, PB, FDN e CEL. Embora a salinidade de 2,5 dS m⁻¹ tenha aumentado o rendimento em matéria seca, reduzindo seu potencial digestível da fibra em FDA, HEM e LDA. A adoção de lâminas de irrigação de até 66% da ETc mostrou-se a estratégia de manejo mais eficiente, ao conciliar a tolerância ao estresse salino com a manutenção de um perfil fibroso mais adequado para a alimentação de ruminantes.

Palavras-chave: agricultura sustentável; composição bromatológica; irrigação deficitária; estresse salino; valor nutricional.

CHAPTER III

FORAGE POTENTIAL OF MORINGA OLEIFERA UNDER ABIOTIC STRESS: AN ALTERNATIVE FOR RUMINANTS IN THE SEMI-ARID REGION

ABSTRACT: Objective was to determine the nutrient content of *Moringa oleifera* cultivated under semi-arid conditions and to evaluate the effects of irrigation water salinity up to 4.5 dS m⁻¹ and deficit irrigation up to 33% of crop water requirement on its chemical composition, aiming to assess its potential as a strategic forage resource for ruminant nutrition in the Brazilian semi-arid region. The experiment was conducted in a 0.3 ha experimental area at the Federal University of Semi-Arid Region, in the municipality of Mossoró-RN-Brazil, between July 2022 and March 2024. A randomized block design in a 3×3+1 factorial arrangement with four replicates was used. The factors consisted of three levels of irrigation water salinity (S1=0.5; S2=2.5; S3=4.5 dS m⁻¹) and three irrigation depths based on crop evapotranspiration - ET_c (L1=33%; L2=66%; L3=100%), plus a non-irrigated control treatment (T0). Plants were pruned every 60 days and analyzed for dry matter (DM), crude protein (CP), total carbohydrates (TCH), ether extract (EE), and mineral matter (MM), neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF), lignin (ADL), hemicellulose (HEM), and cellulose (CEL). Data were subjected to analysis of variance and Tukey's and Dunnett's tests. The proximate composition of moringa under full irrigation (S1L3) showed average values of 21% DM, 12.8% CP, 41.4% NDF, and 32.5% ADF. Water deficit up to 33% ET_c and salinity up to 4.5 dS m⁻¹ did not significantly alter the contents of DM, CP, NDF, and CEL. However, salinity of 2.5 dS m⁻¹ increased dry matter yield while reducing the digestible fiber potential, as indicated by ADF, HEM, and ADL. The adoption of irrigation depths up to 66% ET_c with saline water proved to be the most efficient management strategy, reconciling salt stress tolerance with the maintenance of a more suitable fiber profile for ruminant nutrition.

Keywords: sustainable agriculture; bromatological composition; deficit irrigation; salt stress; nutritional value.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais enfrentam altos índices de degradação natural devido a ações antrópicas e desastres naturais, impactando o abastecimento de alimentos (Abbas; Elsharbasy; Fadlelmula, 2018). Associado a isto, o crescimento populacional nas últimas décadas aumentou significativamente a demanda por alimentos, pressionando sistemas produtivos e agravando a insegurança alimentar, especialmente em populações vulneráveis em regiões áridas e semiáridas (Gheyi *et al.*, 2016). No semiárido brasileiro, esses desafios são crescentes diante dos impactos severos de disponibilidade hídrica, agricultura irrigada e biodiversidade, o que acentua a vulnerabilidade do setor agrícola na produção de alimentos, tornando necessário o estudo de meios sustentáveis de produção de alimentos, conservação ambiental, inovação social e fortalecimento da resiliência local para garantir sustentabilidade e qualidade de vida na região (Ledru *et al.*, 2020; Silva; Arnan; Medeiros, 2024; Soares *et al.*, 2021).

A região apresenta-se como um dos semiáridos mais povoados do mundo, com 28 milhões de habitantes, estando 62% presentes nas zonas urbanas e 38% nas zonas rurais (INSA, 2024). Destaca-se pelo potencial produtivo pequenos ruminantes como estratégia para enfrentar o desafio global de aumentar a produção de alimentos em áreas rurais (Guimarães *et al.*, 2022; Lobo, 2019; Meza-Herrera *et al.*, 2022), possuindo cerca de 15,5 milhões de ovinos e 12,3 milhões de caprinos, conforme dados da Pesquisa Pecuária Municipal no ano de 2023, maiores índices destas espécies desde o início da pesquisa, sendo a região nordeste responsável pelo maior efetivo com 96,0% do total de caprinos e 71,2% de ovinos do País (IBGE, 2024). O rebanho bovino também aumentou na mesma pesquisa, atingindo 38,6 milhões de cabeças de gado no nordeste brasileiro, representando 16,2% do efetivo nacional. Esses dados evidenciam a necessidade da produção crescente de forragem para suplementação dessas espécies em expansão na região semiárida brasileiro (Abdoun *et al.*, 2022; Borah; Haloi, 2024).

Nesse contexto, o cultivo de espécies resilientes ao semiárido brasileiro é fundamental para a sustentabilidade da pecuária, uma vez que a escassez hídrica é um fator limitante para o cultivo de espécies forrageiras de alta qualidade utilizada na alimentação de ruminantes na região (Bhrijavasi *et al.*, 2024). A *moringa oleífera* apresenta-se como promissora opção forrageira, devido a sua capacidade de crescer rapidamente, resistir ao estresse hídrico e adaptar-se a diferentes tipos de solo e manejo de irrigação, sendo uma alternativa viável como estratégia de alimentação para aumentar a produção animal em áreas tropicais (Díaz; Friedrich, 2014).

Sob o aspecto nutricional, suas folhas apresentam teores elevados de proteína bruta (10,7–29%), fibras (7–19%), cinzas (7–11%), lipídeos (4–10%) e carboidratos (24–57%), percentuais adequados para a dieta de ruminantes (Abbas; Elsharbasy; Fadlelmula, 2018; Borah; Haloi, 2024; Catunda *et al.*, 2017; Chaudhary *et al.*, 2023a; Da Silva *et al.*, 2025; Delgado; Valdés-Rodríguez, 2025; Simbaya; Chibinga; Salem, 2020; Valdivié-Navarro *et al.*, 2020), oferecendo uma alternativa alimentar para estas espécies, reduzindo a dependências de forragens convencionais mais exigentes em água e adubação. Contudo, outras pesquisas destacaram a importância de padronizar os intervalos entre cortes, pois o avanço da maturidade impacta na digestibilidade diminuindo o valor nutricional das folhas (Mendez *et al.*, 2018; Martinez; Amador, 2019), e definir os níveis seguros de inclusão na dieta avaliando critérios de manejo e palatabilidade (Granella *et al.*, 2021).

Portanto, objetivou-se determinar o teor de nutrientes da *Moringa oleífera* cultivada em condições semiáridas e avaliar os efeitos da salinidade da água de irrigação até 4,5 dS m⁻¹ e da irrigação deficitária até 33% da necessidade hídrica na sua composição química, visando ponderar sua utilização como recurso forrageiro estratégico para a alimentação de ruminantes no semiárido brasileiro.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido no campus Leste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), pertencente ao Centro de Ciências Agrárias, no município de Mossoró, estado do Rio Grande do Norte (RN), coordenadas: 5°12'48'' de latitude Sul, 37°18'44'' longitude Oeste e altitude de 37 m acima do nível do mar. O clima foi classificado como BShs de acordo com Köppen, caracterizado precipitações escassas e irregulares geralmente entre 400 mm e 800 mm e por temperatura média anual de 26°C (Alvares *et al.*, 2013). O experimento ocorreu entre julho de 2022 a março de 2024, sendo considerados dois períodos secos – julho/2022 a janeiro/2023 e agosto/2023 a março/2024 – e um período chuvoso durante os meses de fevereiro a julho de 2023.

A irrigação foi similar para todos os tratamentos até 60DAT, totalizando 46mm. A água de irrigação durante a aplicação dos tratamentos nas duas estações secas foram de L1= 107,6; L2=215,2 e L3=322,9 mm e L1= 156,9; L2=266 e L3=376 mm, respectivamente, sendo aplicado durante todo o período experimental, L1=264,5; L2= 481,2 e L3= 698,9 mm, obtendo-se nestes períodos a temperatura média de 28,5, 21,9 e 35,9 °C para a média, mínima e máxima, respectivamente, e a umidade relativa mínima, média e máxima com valores de 65,5, 24,5 e 98,5%, respectivamente. A estação chuvosa contabilizou 568,29 mm de precipitação efetiva acumulada, com temperatura média, mínima e máxima registrou valores de 26,73, 22,31 e 33,92 °C, e a umidade relativa foi de 70,3, 31,0 e 99 %, para a média, mínima e máxima, respectivamente

O solo da área foi classificado como Plintossolo conforme o SiBCS – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, (SANTOS *et al.*, 2018), apresentando-se não sódico e não salino (CE < 4 dS m⁻¹; RAS < 15 e pH < 8,5) até a profundidade de 0,4m (Richards, 1969). O teor de Na⁺; K⁺; Ca²⁺ e Mg²⁺ foi de 39; 89,5; 740; 120 mg/dm³ respectivamente (Teixeira *et al.*, 2017).

A irrigação foi aplicada levando em consideração o monitoramento do potencial matricial no tratamento de irrigação plena usando água doce (S1L3, S1 - 0,5 dS.m⁻¹; L3 -100%ET_c), usando a leitura de seis tensiômetros instalados em duas parcelas — aceitando uma flutuação do potencial matricial do solo entre -6 e -20 kPa. Os tensiômetros situaram-se em duas plantas aleatórias, sendo dois deles nas profundidades de 0,15; 0,35 e 0,55 m, considerando o volume de aplicação de lâmina líquida de água na zona radicular da cultura, para a camada 0-0,5 m, assumido um fator de molhamento de 0,30, e assim estimando para uma vazão do emissor por planta de 90 L h⁻¹ nos tratamentos de 100%ET_c (L3).

Até os 60 DAT, para assegurar a estabilização do stand, o manejo da irrigação foi uniformizado entre todos os tratamentos, totalizando duração de 10 minutos e uma frequência de 3 vezes/semanais. A aplicação de água foi realizada via sistema de irrigação por gotejamento, com fita gotejadora de emissores de 0,4m até 30 dias, e duas fitas por fileira a partir desta data, ficando um espaçamento médio de 0,2m. A fonte hídrica foi a rede de abastecimento local, operada pela Companhia de Água e Esgoto do Rio Grande do Norte (CAERN), cuja água apresenta condutividade elétrica (CE) de 0,5 dS m⁻¹ e Razão de Adsorção de Sódio (RAS) de 1,00.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, esquema fatorial 3 × 3 + 1, com quatro repetições e uma testemunha sem irrigação (T0) após 60 DAT. As parcelas experimentais foram constituídas por uma linha de seis plantas, sendo três plantas centrais úteis e as marginais utilizadas como bordaduras. Os tratamentos irrigados consistiram da interação de três lâminas de irrigação, determinada pela evapotranspiração da cultura - ET_c (L1 = 33%; L2=66% e L3= 100%ET_c) e três níveis de salinidade da água de irrigação pela condutividade elétrica - CEa (S1=0,5 dS m⁻¹; S2=2,5 dS m⁻¹ e S3=4,5 dS m⁻¹).

As plantas foram originárias de sementes colhidas em matrizes localizadas no campus Leste da UFERSA e plantadas uma semente por célula em bandejas de polietileno de 200 células, a partir de substrato misturado de 50% dos substratos comerciais Fibra de Coco® e Carolina®,

este último composto de turfa, vermiculita, casca de arroz carbonizada, resíduo orgânico e NPK. As bandejas foram alocadas em estufas de aclimação e a irrigação foi realizada manualmente com água de abastecimento local ($CE = 0,5 \text{ dS m}^{-1}$) duas vezes ao dia. A emergência iniciou-se em cinco dias após a semeadura (DAS) e o transplante ocorreu quando as mudas apresentaram altura de 0,20 aos 30 DAS.

No campo experimental, realizou-se uma gradagem na camada de 0,20 m de profundidade do solo, seguida de aberturas das covas nas dimensões de $0,10 \times 0,10 \times 0,10 \text{ m}$ com espaçamento de $3,0 \times 1,5 \text{ m}$, adubação de fundação com 50 g de MAP (52% P_2O_5 e 11% N) por cova e transplante de uma muda/cova.

A diferenciação das lâminas de irrigação ocorreu aos 90DAT, através da troca do sistema de irrigação de gotejamento por microtubos, utilizando um emissor/planta, a partir da pressão de serviço calculada. Aos tratamentos 100%ETc (L3), garantiu-se a continuidade da vazão 90 L h^{-1} , procedendo o cálculo da redução da vazão para os tratamentos de déficit hídrico na proporção de 66%ETc (L1) e 33%ETc (L2), que foram estimados em 30 l h^{-1} e 60 l h^{-1} , respectivamente a partir do dimensionamento hidráulico do sistema de irrigação modificando diâmetro e comprimento dos microtubos para atender as vazões requeridas.

Dessa forma, as linhas laterais foram instaladas com mangueiras de diâmetros de 14 mm e um microtubo de 1,5 mm no tratamento L1, mangueiras de 16 mm e dois microtubos de 1,5 mm em L2, enquanto o tratamento L3 consistiu em uma mangueira de 16 mm combinada com um microtubo de 3,0 mm, como demonstrado na figura 3. Os comprimentos de cada microtubo foram variados de acordo com a carga hidráulica, vazão e diâmetro interno do microtubo, conforme adaptação da metodologia proposta por Souza; Botrel (2004) e Frizzone *et al.* (2012).

As diferentes salinidade entre tratamentos foram provenientes da água de abastecimento Companhia de Águas e Esgoto do Rio Grande do Norte (CAERN), no município de Mossoró-RN ($0,5 \text{ dS m}^{-1}$) no tratamento S1, enquanto as águas salinas ($2,5 \text{ dS}$ e $4,5 \text{ dS m}^{-1}$) sintetizadas

originaram-se de diluição de NaCl (155 g L^{-1}), $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (625 g L^{-1}) e água-mãe com concentração de 29° Baumé ($\text{Mg}^{2+} = 54,30 \text{ g L}^{-1}$, $\text{Na}^+ = 48,82 \text{ g L}^{-1}$ e $\text{K}^+ = 14,89 \text{ g L}^{-1}$) em água não salina de modo a obter uma proporção molar de cargas final de 7:2:1 (Na:Ca:Mg), de acordo com achados de Medeiros (1992), simulando a composição média das águas salobras utilizadas para irrigação no semiárido nordestino, com aferição da CEa com condutivímetro de bancada digital CD-820 (Instrutherm, São Paulo, São Paulo, Brasil).

A proporção de sais na água representou a condutividade elétrica média das águas subterrâneas da região do município de Mossoró-RN-Brasil, que se caracterizam como cloretadas sódicas e apresentam sólidos totais dissolvidos acima dos critérios de potabilidade, provenientes do cristalino, das zonas recobertas pela Formação Barreiras e aluviões (Feitosa; Diniz, 2011).

Após a diferenciação dos tratamentos, foi realizada a poda formação favorecendo a ramificação lateral e produção de biomassa da planta, iniciada quando as plantas apresentaram 1,20 m de altura, sendo submetidas a cortes apicais na altura de 80 cm. Às podas seguintes, denominada poda produção, foram instituídos intervalos de cortes a cada 60 dias, a fim de manter a qualidade nutricional da moringa, conforme metodologia de Sobral; Muniz; Silva (2020).

As podas produção ocorreram aos 90; 150; 210; 270; 345; 435; 495 e 555 e com o auxílio de motosserra de poda portátil, mediante corte dos ramos a altura de corte de 1,10 m e trituração em desintegrador forrageiro duas navalhas e 10 martelos. Para amostragem, utilizou-se três plantas úteis de cada parcela, que foram fracionadas e acondicionadas em sacos de papel “kraft” para secagem em estufa de ventilação forçada (Modelo TE-394/2-MP, Tecnal®, Brasil) a $65 \pm 2^\circ\text{C}$ até massa constante, por um período mínimo de 72 horas. O teor de matéria seca (MS), proteína bruta (PB), cinzas (MM), extrato etéreo (EE) foram determinadas de acordo com a AOAC (2009); a fibra detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), lignina em detergente ácido (LDA), celulose (CEL) e hemicelulose (HEM) segundo Van Soest (1991). Para análise estatística,

consideraram-se as médias obtidas entre as amostras originárias dos cortes de cada período, como detalhado na tabela 1.

Tabela 1. Período das podas para avaliação da composição química da forragem e total de dias de aplicação de tratamentos nos períodos secos

Períodos avaliados	Duração em meses	Podas realizadas por período	Dias de aplicação dos tratamentos
Período Seco 1 (PS1)	julho/2022 a janeiro/2023	90 e 150DAT	60 a 167DAT
Período chuvoso (PC)	fevereiro/2023 a julho de 2023	210; 270; 345 DAT	Sem aplicação
Período Seco 2 (PS2)	agosto/2023 a março/2024	435; 495 e 555DAT	374 a 555DAT

Os dados analisados foram analisados para a distribuição normal dos dados utilizando o teste de Klmogorov-Smirnov e teste de Bartlett, submetidos a análise de variância (ANOVA) pelo teste de F ($p \leq 0,05$), conforme descrito por Banzato e Kronka (2013). As médias referentes aos tratamentos irrigados e o tratamento testemunha pelo teste Dunnet a 5%, enquanto as médias entre os fatores isolados lâminas de irrigação ou níveis de aplicação de sais foram comparadas pelo Teste de médias de Tukey ($p < 0,05$).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A composição centesimal média da *Moringa oleifera* Lam (moringa) cultivada sob regime de irrigação plena – S1L3 – nos 20 meses de experimentação apresentou $21 \pm 5,8\%$ de matéria seca (MS), $8,9 \pm 2,14\%$ de cinzas, $4,7 \pm 2,2\%$ de extrato etéreo (EE), $12,8 \pm 6,8\%$ de proteína bruta (PB), $41,4 \pm 8,7\%$ de fibra em detergente neutro (FDN), $32,5 \pm 3,4\%$ de fibra em detergente ácido (FDA), $6,2 \pm 2,7$ de lignina em detergente ácido (LDA), $26,9 \pm 1,9\%$ de celulose (CEL) e $9 \pm 5,4\%$ de hemicelulose (HEM).

A composição centesimal das espécies vegetais pode variar consideravelmente conforme o local de cultivo, manejo, parte da planta analisada e condições ambientais. A composição de referência para o tratamento S1L3 (irrigação plena com água de baixa salinidade) da Moringa

oleífera Lam (moringa) distinguiu-se das forrageiras tropicais por apresentar menores teores de MS, FDN e HEM e maiores concentrações de PB e EE, enquanto MM, CHT, CEL, FDA e LDA mantiveram-se valores consistentes com os observados em outras espécies forrageiras da região. (Masitlha; Seifu; Teketay, 2024b; Mokoboki *et al.*, 2019; Sánchez; Ledin; Ledin, 2006; Simbaya; Chibinga; Salem, 2020).

Zheng; Zhang; Wu (2016) obtiveram valores médios de PB (23,5%), de cinzas (9,4%), de FDN (29,3%) e de FDA (20,8%), sugerindo a moringa como forrageira de alto valor biológico em proteína e de componente fibroso equilibrado com alta taxa de digestão para ruminantes, especialmente a espécie bovina.

A Tabela 2 indica o percentual de matéria seca (MS) nos períodos avaliados, indicando diferença significativa entre os tratamentos irrigados e o controle. O percentual de matéria seca (MS) na forragem é o principal indicador de consumo de energia, proteína, fibras, vitaminas e minerais pelo animal, impactando diretamente seu desempenho produtivo e reprodutivo. Forrageiras com baixa disponibilidade ou qualidade de MS podem desenvolver deficiências nutricionais, menor produtividade e maior risco de distúrbios metabólicos em ruminantes (Silva *et al.*, 2025, 2016).

Tabela 2. Resumo da análise de variância do teor de matéria seca (MS) dos períodos avaliados sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação.

FV	GL	PS1	PC	PS2
Significância est. F				
Fat × T0	1	0,021	0,407 ^{ns}	0,026
Sal	2	0,180 ^{ns}	0,042	0,423 ^{ns}
Lam	2	0,948 ^{ns}	0,352 ^{ns}	0,441 ^{ns}
Sal × Lam	4	0,383 ^{ns}	0,071 ^{ns}	0,711 ^{ns}
DMS (Tukey) Sal ou Lam		1,20	1,48	1,48
DMS (Dunnett) T0 vs Sal ou Lam		1,60	1,97	1,62
DMS (Dunnett) T0 vs Trat		2,39	2,93	2,41
CV (%)		6,3	6,3	5,7
Médias		19,0	23,0	21,1
T0		20,4	23,6	22,5
S1		19,4	22,1b	21,4
S2		18,7*	23,7a	20,7*
S3		18,5*	23,0ab	20,9
L1		18,8*	23,4	21,3
L2		18,9	22,9	20,7*
L3		18,9	22,6	21,0

FV = Fator de variância, GL = Grau de liberdade, PS1 = Período seco 1, PC = período chuvoso, PS2 = período seco 2, Fat = de irrigação; Lam= Lâmina de irrigação; T0 = tratamento sem irrigação; ns = não há diferença significativa entre tratamentos; *Diferença significativa em relação ao tratamento controle (T0) pelo teste de Dunnett à 5% de probabilidade; Letras minúsculas iguais não diferem entre si para os níveis de salinidade pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

De acordo com a figura 1, os tratamentos sem irrigação apresentaram teores de MS superiores a alguns irrigados nos dois períodos secos avaliados. Em PS1, a MS diminuiu a partir da irrigação com água salobra de 2,5 dS m⁻¹ ou com disponibilidade hídrica de 33%ETc, sugerindo que o aumento da salinidade e a extrema restrição hídrica impactaram negativamente no percentual de MS. Em PS2, este decréscimo ocorreu somente nos tratamentos com irrigação de 2,5dS m⁻¹ ou 66%ETc. Estes dados referenciam que a não irrigação nos períodos secos favoreceu o percentual de MS da forragem (folha+caule) produzida pela moringa, principalmente em relação aos tratamentos irrigados com água salobra de 2,5dS m e nos tratamentos de restrição hídrica (33% e 66%ETc).

Em relação ao teor de MS, não houve diferença significativa entre restrições hídricas submetidas e irrigação plena (100%ETc) nos períodos secos avaliados, entretanto no período chuvoso houve diferenças significativas entre os níveis salinos da água, onde a CE de 2,5 dS m⁻¹ apresentou teor de MS superior ao tratamento com água de baixa salinidade (0,5 dS m⁻¹), e o S3 produziu MS em proporção similar aos demais, portanto a salinidade a partir de 2,5 dS m⁻¹ foi

positiva para aumentar o teor de MS, efeito favorável para sua utilização na alimentação por ruminantes.

De acordo com a Tabela 3, os tratamentos sem irrigação e os irrigados não apresentaram diferença significativa de matéria mineral (MM) nesta pesquisa, como também nos dois períodos secos avaliados (PS1 e PS2), contrapondo outros autores que verificaram maior acúmulo de sódio (Na) e cloro (Cl) na biomassa das plantas a partir de irrigação com água salobra em algumas culturas tolerantes, como sorgo, espinafre e milheto (Ferreira *et al.*, 2018; Patel *et al.*, 2022; Sousa *et al.*, 2010; Yang; Shukla; Du, 2023).

Tabela 3. Resumo da análise de variância do teor de matéria mineral (MM) dos períodos avaliados sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação.

FV	GL	PS1	PC	PS2
Significância do teste F				
Fat × T0	1	0,876 ^{ns}	0,640 ^{ns}	0,895 ^{ns}
Sal	2	0,196 ^{ns}	0,066 ^{ns}	0,913 ^{ns}
Lam	2	0,458 ^{ns}	0,234 ^{ns}	0,543 ^{ns}
Sal × Lam	4	0,053 ^{ns}	0,036	0,227 ^{ns}
DMS (Tukey) Sal ou Lam		0,93	0,78	0,92
DMS (Tukey) Sal x Lam		1,61	1,35	1,60
DMS (Dunnett) T0 vs Sal ou Lam		1,24	1,04	1,23
DMS (Dunnett) T0 vs Trat		1,84	1,55	1,83
CV (%)		10,8	9,0	9,8
Médias		8,47	8,56	9,33
Médias de MM para PC				
Sal		L1	L2	L3
S1		8,05Aab	8,30Aa	8,12Ab
S2		7,61Bb	8,72ABa	9,65Aa
S3		9,17Aa	8,90Aa	8,68Aab
T0		8,40		

FV = Fator de variância, GL = Grau de liberdade, PS1 = Período seco 1, PC = período chuvoso, PS2 = período seco 2, Fat = Médias dos tratamentos irrigados; DMS = diferença mínima significativa; CV = Coeficiente de variação; Sal= Salinidade da água de irrigação; Lam= Lâmina de irrigação; T0 = tratamento sem irrigação; ns = não há diferença significativa entre tratamentos; Letras minúsculas iguais não diferem entre si para os níveis de salinidade pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$), e letras maiúsculas iguais não diferem entre si as lâminas de irrigação pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

Entretanto, durante o período chuvoso, houve diferença significativa de MM na forragem colhida, onde os tratamentos irrigados com salinidade 2,5 dS m⁻¹ – S2 – foram influenciados positivamente pelo aumento da lâmina de irrigação, apresentando em L3 incremento de 26,8% de MM em relação a L1. Este fator pode ser justificado pelo aumento da concentração de sais na zona

radicular, comum em lâminas deficitárias de irrigação, reduzindo a absorção de nutrientes como K, Ca e Mg e aumento no teor de Na e Cl (Da Silva *et al.*, 2023).

Entre os tratamentos com lâmina deficitária de 33%ETC, os tratamentos S3 apresentaram acréscimo de 20,5% no teor de minerais em relação ao S2, sugerindo que o aumento da salinidade favoreceu o acúmulo de minerais na biomassa da planta. Nos tratamentos com maior volume de irrigação – 100%ETC, o teor de minerais de S2 aumentou 20% em relação a S1, concordando com a evidência de acúmulo de minerais na planta, sendo necessário realizar análise de nutrientes e outros elementos para detecção de quais minerais foram absorvidos pela parte aérea.

A ocorrência deste evento no período chuvoso, com ausência de aplicação dos tratamentos, sugere que a fração de aplicada de água pluvial lixiviou parcialmente o acúmulo desses minerais nas camadas mais profundas do solo, controlando seu percentual na planta no período seguinte de aplicação de tratamentos (PS2) (Campos *et al.*, 2023).

É desejável que um maior teor de MM esteja relacionado a um maior valor nutricional da forragem, contudo se esse aumento for principalmente devido a íons como sódio (Na^+), pode indicar estresse salino e refletir em perda de qualidade para o consumo animal, dependendo da proporção. Portanto, seria necessária uma análise profundada de quantificação de macro e micronutrientes para determinar a fração nos minerais presentes nas amostras.

A tabela 4 resume a análise de variância da proteína bruta (PB) em diferentes períodos, avaliando os efeitos de lâminas de irrigação (Lam), níveis de salinidade (Sal) e suas interações. Não houve diferença significativa entre T0 e os tratamentos irrigados ($p>0,05$), indicando que os tratamentos avaliados não alteram a PB.

Tabela 4. Resumo da análise de variância de proteína bruta (PB) dos períodos avaliados sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação.

FV	GL	PS1	PC	PS2
Significância do teste F				
Fat × T0	1	0,270 ^{ns}	0,157 ^{ns}	0,587 ^{ns}
Sal	2	0,706 ^{ns}	0,926 ^{ns}	0,576 ^{ns}
Lam	2	0,558 ^{ns}	0,928 ^{ns}	0,514 ^{ns}
Sal × Lam	4	0,004	0,139 ^{ns}	0,236 ^{ns}
DMS (Tukey) Sal ou Lam		1,24	2,59	1,61
DMS (Tukey) Sal x Lam		2,14	4,48	2,80
DMS (Dunnett)) Sal ou Lam		1,65	3,44	2,15
DMS (Dunnett) T0 vs Trat		2,45	5,13	3,20
CV (%)		8,2	17,7	11,6
Médias		14,8	14,4	13,8
Médias de PB para PS1				
Sal		L1	L2	L3
S1		14,60ABa	16,43Aa	13,78Ba
S2		14,51Aa	15,25Aab	13,82Aa
S3		15,08ABa	13,45Bb	15,91Aa
T0		15,48		

FV = Fator de variância, GL = Grau de liberdade, PS1 = Período seco 1, PC = período chuvoso, PS2 = período seco 2, Fat = Medias dos tratamentos irrigados; DMS = diferença mínima significativa; CV = Coeficiente de variação; Sal= Salinidade da água de irrigação; Lam= Lâmina de irrigação; T0 = tratamento sem irrigação; ns = não há diferença significativa entre tratamentos; Letras minúsculas iguais não diferem entre si para os níveis de salinidade pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$) e letras maiúsculas iguais não diferem entre si as lâminas de irrigação pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

Observa-se um efeito de interação significativo ($p = 0,004$) apenas no PS1, quando a planta ainda estava em fase de desenvolvimento inicial (até 150DAT), onde a salinidade S2 não interferiu no efeito isolado das lâminas de irrigação em relação a PB. Já nas parcelas irrigadas com água de salinidade $4,5 \text{ dS m}^{-1}$, foi necessária a aplicação de 100%ETc na irrigação para obter o maior teor de PB, enquanto a lâmina intermediária (66%ETc) diminuiu seu percentual em 15,5%. Com relação aos tratamentos com água de qualidade (S1), a lâmina de irrigação 66%ETc foi suficiente para maximizar o teor de proteína, enquanto reduziu seu percentual em 19,2% com a aplicação da lâmina máxima (L3).

Dentre os tratamentos irrigados com 66%ETc, apresentaram o maior percentual de PB (16,43%) quando irrigada com água de baixa salinidade (S1) e o teor mais baixo em S3 (13,45%), sugerindo que a salinidade influenciou negativamente na captação de N na biomassa da planta. Fernandes (2017), determinou a mesma quantidade de PB (16,18%) na moringa em condições de

irrigação plena utilizando as mesmas partes da planta na análise (folha+caule), enquanto nesta pesquisa o mesmo percentual foi alcançado com economia hídrica de 33%ETc, fator importante para a cadeia pecuária de ruminantes criados em locais com escassez de água.

Pesquisas recentes destacam a moringa como suplemento proteico eficiente para ruminantes, especialmente em épocas de escassez de pasto, evidenciando seu alto teor de proteína bruta (20–30% na MS). Também evidenciam que sua inclusão na dieta (10–20% da mistura concentrada) melhora a ingestão de proteína, a digestibilidade da matéria seca e da fibra, e o ganho de peso em bovinos, caprinos e ovinos, sem efeitos adversos sobre a saúde animal, podendo substituir parcialmente alimentos convencionais (farelo de soja ou concentrados) de alto custo e difícil produção em condições semiáridas, reduzindo custos de alimentação e mantendo ou melhorando a produtividade do rebanho – ganho de peso e produção de leite (Chaudhary *et al.*, 2023; Ibrahima; Kırkpınar, 2024; Leitanthem *et al.*, 2022; Morsy *et al.*, 2022; Su; Chen, 2020)

A Tabela 5 resume os resultados da análise de variância para o teor de extrato etéreo (EE), componente lipídico, em função de lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água nos períodos avaliados. Os resultados indicam que os tratamentos avaliados não influenciaram no percentual de EE entre os tratamentos irrigados, bem como na comparação entre estes e o controle (T0), cuja interação também não foi significativa ($p>0,05$).

Tabela 5. Resumo da análise de variância do extrato etéreo (EE) dos períodos avaliados sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação.

FV	GL	PS1	PC	PS2
Significância do teste F				
Fat × T0	1	0,507 ^{ns}	0,071 ^{ns}	0,247 ^{ns}
Sal	2	0,766 ^{ns}	0,996 ^{ns}	0,983 ^{ns}
Lam	2	0,672 ^{ns}	0,560 ^{ns}	0,490 ^{ns}
Sal × Lam	4	0,624 ^{ns}	0,243 ^{ns}	0,547 ^{ns}
DMS (Tukey)Trat		0,56	0,79	0,73
DMS (Tukey)Trat		0,97	1,37	1,26
DMS (Dunnet)Trat		0,74	1,05	0,97
DMS (Dunnett) T0 vs Trat		1,11	1,57	1,44
CV (%)		14,7	20,8	16,5
Médias		3,8	3,8	4,3

FV = Fator de variância, GL = Grau de liberdade, PS1 = Período seco 1, PC = período chuvoso, PS2 = período seco 2, Fat = Medias dos tratamentos irrigados; DMS = diferença mínima significativa; CV = Coeficiente de variação; Sal= Salinidade da água de irrigação; Lam= Lâmina de irrigação; T0 = tratamento sem irrigação; ns = não há diferença significativa entre tratamentos; Letras minúsculas iguais não diferem entre si para os níveis de salinidade pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$) e letras maiúsculas iguais não diferem entre si as lâminas de irrigação pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

A similaridade dos tratamentos é um resultado relevante, pois indica que o uso de águas com diferentes níveis de salinidade, mesmo sob diferentes regimes de irrigação, não compromete o valor energético associado ao EE da forragem. A inclusão de gordura na dieta de ruminantes é segura até 6% da matéria seca, portanto a média dos tratamentos nos três períodos (3,9%) está dentro do limite seguro de ingestão em ruminantes (Hussein *et al.*, 2024; Ponnampalam *et al.*, 2024).

Pesquisas evidenciam que o teor de EE na dieta de ruminantes influencia a saúde ruminal e o desempenho animal. Joy *et al.* (2021) utilizaram dieta para garrotes com teor de EE na dieta de 3,5% para até 5,9% da MS, o que não alterou o sítio de digestibilidade dos nutrientes, a fermentação ruminal ou a digestibilidade aparente ruminal. Ayanfe *et al.* (2025) avaliaram uma dieta com alta proporção de forragem (70%) + concentrado de alto teor de EE (5,3%), considerando-a uma estratégia prática e custo-efetiva para a produção leiteira sustentável para produzir produtos de alta qualidade para o consumo humano.

A Tabela 6 resume os resultados da análise de variância para o teor de carboidratos totais (CHT), componente lipídico, em função de lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água nos períodos avaliados. Os resultados indicam que os tratamentos avaliados não

influenciaram no percentual de EE entre os tratamentos irrigados, bem como na comparação entre estes e o controle (T0), cuja interação também não foi significativa ($p > 0,05$).

Tabela 6. Resumo da análise de variância dos carboidratos totais (CHT) dos períodos avaliados sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação.

FV	GL	PS1	PC	PS2
Significância do teste F				
Fat × T0	1	0,391 ^{ns}	0,094 ^{ns}	0,953 ^{ns}
Sal	2	0,425 ^{ns}	0,956 ^{ns}	0,277 ^{ns}
Lam	2	0,930 ^{ns}	0,756 ^{ns}	0,824 ^{ns}
Sal × Lam	4	0,006	0,653 ^{ns}	0,022*
DMS (Tukey) entre Sal ou Lam		1,86	2,82	2,06
DMS (Tukey) Sal x Lam		3,22	4,88	3,56
DMS (Dunnett) T0 vs S ou L		2,48	3,75	2,74
DMS (Dunnett) T0 vs Trat		3,69	5,58	4,08
CV (%)		2,5	3,8	2,8
Médias		72,9	73,3	73,4
Médias para o CHT em PS1				
Sal vs Lam		L1	L2	L3
S1		72,23ABa	70,89Bb	74,36Aa
S2		74,32Aa	72,47Aab	73,63Aa
S3		72,76ABa	75,25Aa	71,40Ba
T0		72,19		
Médias para o CHT em PS2				
Sal vs Lam		L1	L2	L3
S1		70,77Bb	72,45ABa	74,80Aa
S2		75,32Aa	74,45Aa	72,28Aa
S3		73,81Aab	74,21Aa	72,61Aa
T0		73,47		

FV = Fator de variância, GL = Grau de liberdade, PS1 = Período seco 1, PC = período chuvoso, PS2 = período seco 2, Fat = Médias dos tratamentos irrigados; DMS = diferença mínima significativa; CV = Coeficiente de variação; Sal= Salinidade da água de irrigação; Lam= Lâmina de irrigação; T0 = tratamento sem irrigação; ns = não há diferença significativa entre tratamentos; Letras minúsculas iguais não diferem entre si para os níveis de salinidade pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$) e letras maiúsculas iguais não diferem entre si as lâminas de irrigação pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

O teor de CHT representa a fração de carboidratos não-fibrosos (CNF) mais os carboidratos fibrosos (FDN e FDA), um parâmetro crucial na nutrição de ruminantes, pois constitui a principal fonte de energia fermentada no rúmen para a produção de ácidos graxos voláteis (AGV). Nesta pesquisa, analisou-se diferença significativa de seu armazenamento pela planta nos dois períodos de aplicação de tratamentos – PS1 e PS2. Em PS1, as salinidades da água de irrigação S1 e S3 influenciaram no teor de carboidratos em relação as lâminas de irrigação aplicadas. Em S1, a irrigação convencional (L3) aumentou 4,9% de CHT em relação a deficitária

de 66%ETc. Ao contrário, em S3, L3 apresentou o percentual de CHT menor 5,4% em relação a L2.

Em PS2, apenas a irrigação com água de boa qualidade (S1) apresentou influência de diferentes lâminas de irrigação, onde L3 apresentou aumento de 5,7% de CHT em relação a L1; os demais tratamentos irrigados com água de baixa qualidade não obtiveram diferença significativas de CHT entre tratamentos. Entre os tratamentos de irrigação deficitária, quando submetida a estresse hídrico de 33%ETc, S2 apresentou-se superior a S1, considerando a salinidade na irrigação como responsável pelo incremento de 6,42% do teor de CHT.

Desse modo, sugere-se o controle do volume de irrigação atenua os efeitos negativos do estresse salino a 4,5 dS m⁻¹, permitindo que a planta mantenha funções fisiológicas essenciais, como o acúmulo de osmólito, estimulando a planta a acumular carboidratos solúveis (açúcares, amido) e aumentando a fração energética mais rapidamente disponível no rúmen (Hafez *et al.*, 2021).

A Tabela 7 apresenta o resumo da análise de variância para os teores de Fibra Detergente Neutro (FDN), em função da interação entre lâminas de irrigação (Lam) e salinidade da água (Sal), avaliada em três períodos climáticos. Os dados apresentados não evidenciaram diferença significativa no percentual de FDN (p>0,05) em relação ao estresse hídrico e salino.

Tabela 7. Resumo da análise de variância para os períodos avaliados de fibra detergente neutro (FDN), sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação.

FV	GL	PS1	PC	PS2
Significância do teste F				
Fat × T0	1	0,460 ^{ns}	0,918 ^{ns}	0,571 ^{ns}
Sal	2	0,532 ^{ns}	0,101 ^{ns}	0,063 ^{ns}
Lam	2	0,690 ^{ns}	0,129 ^{ns}	0,471 ^{ns}
Sal × Lam	4	0,146 ^{ns}	0,210 ^{ns}	0,324 ^{ns}
CV (%)		10,6	7,0	8,6
Médias		40,5	42,6	39,3

FV = Fator de variância, GL = Grau de liberdade, PS1 = Período seco 1, PC = período chuvoso, PS2 = período seco 2, Fat = Médias dos tratamentos irrigados; DMS = diferença mínima significativa; CV = Coeficiente de variação; Sal= Salinidade da água de irrigação; Lam= Lâmina de irrigação; T0 = tratamento sem irrigação; ns = não há diferença significativa entre tratamentos.

A similaridade entre os tratamentos irrigados e T0 sugerem que o manejo de irrigação utilizado, mesmo com água salina, não influenciou a qualidade fibrosa, entretanto houve alteração no teor de FDA a longo prazo, evidente no período seco 2, conforme demonstra a Tabela 8.

Tabela 8. Resumo da análise de variância dos períodos avaliados para fibra detergente ácido (FDA), sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação.

FV	GL	PS1	PC	PS2
Significância do teste F				
Fat × T0	1	0,117 ^{ns}	0,225 ^{ns}	0,277 ^{ns}
Sal	2	0,997 ^{ns}	0,604 ^{ns}	0,364 ^{ns}
Lam	2	0,082 ^{ns}	0,137 ^{ns}	0,220 ^{ns}
Sal × Lam	4	0,790 ^{ns}	0,271 ^{ns}	0,046
DMS (Tukey) Sal vs Lam		3,58	2,24	2,15
DMS (Tukey) T0 vs Trat		6,20	3,87	3,72
DMS (Dunnett) T0 vs Sal ou Lam		4,76	2,97	2,86
DMS (Dunnett) T0 vs Trat		7,09	4,43	4,25
CV (%)		10,0	7,0	7,1
Médias		32,7	31,3	29,8
Médias de FDA para PS2				
Sal vs Lam		L1	L2	L3
S1		31,68Aa	34,52Aa	32,99Aa
S2		30,19Ba	33,93ABa	35,09*Aa
S3		31,55Aa	34,73*Aa	32,60Aa
T0		30,02		

FV = Fator de variância, GL = Grau de liberdade, PS1 = Período seco 1, PC = período chuvoso, PS2 = período seco 2, Fat = Médias dos tratamentos irrigados; DMS = diferença mínima significativa; CV = Coeficiente de variação; Sal= Salinidade da água de irrigação; Lam= Lâmina de irrigação; T0 = tratamento sem irrigação; ns = não há diferença significativa entre tratamentos; *Diferença significativa em relação ao tratamento controle (T0) pelo teste de Dunnett à 5% de probabilidade; Letras minúsculas iguais não diferem entre si para os níveis de salinidade pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$), e letras maiúsculas iguais não diferem entre si as lâminas de irrigação pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

Contudo outras porções da parede celular, como o FDA, apresentaram diferença significativa na interação do efeito combinado da salinidade e da lâmina de irrigação no segundo período seco ($p = 0,046$). A figura 5 demonstra as frações de FDA entre os tratamentos avaliados, destacando que o uso da salinidade 2,5 dS m⁻¹ na irrigação aumentou o FDA da forragem quando utilizada a irrigação convencional de 100%ETc em 16,23% em relação a irrigação de 33%ETc, indicando que os efeitos combinados se manifestam sob estresse hídrico prolongado (PS2), afetando a lignificação ou a composição da parede celular.

Estudos mostram que, isoladamente, salinidade e lâmina de irrigação frequentemente não alteram significativamente os teores de FDN e FDA em forrageiras. Contudo, no segundo período

seco, a interação entre esses fatores influenciou o teor de FDA, mostrando que condições específicas de manejo da irrigação com água salina podem alterar a digestibilidade da fibra em situações de déficit hídrico a longo prazo (Abebe; Tu, 2024; Hedayati-Firoozabadi *et al.*, 2020; Soni *et al.*, 2023).

A tabela 9 apresenta os percentuais de celulose (CEL), hemicelulose (HEM) e lignina (LDA) determinados na forragem colhida nos períodos analisados. Não houve diferença significativa entre os tratamentos irrigados e entre estes e o controle no conteúdo de CEL. A HEM obteve diferença significativa entre os tratamentos irrigados, demonstrando que a restrição hídrica até 66%ETc manteve a hemicelulose igual nos tratamentos analisados. Já entre os tratamentos irrigados e o controlado, evidenciou-se redução significativa de hemicelulose no tratamento S2 de 31,3% impactando negativamente na degradabilidade pelos microrganismos ruminais, e consequentemente na digestibilidade e o valor nutricional da forragem para ruminantes a partir do manejo de irrigação com salinidade a partir de 2,5 dS m⁻¹.

Tabela 9. Resumo da análise de variância para os períodos avaliados de celulose (CEL), hemicelulose (HEM) e LDA sob lâminas de irrigação (Lam) e níveis de salinidade (Sal) da água de irrigação.

		CEL (%)			HEM (%)			LDA (%)		
FV	GL	PS1	PC	PS2	PS1	PC	PS2	PS1	PC	PS2
Significância do teste F										
Fat × T0	1	0,170 ^{ns}	0,346 ^{ns}	0,152 ^{ns}	0,068 ^{ns}	0,286 ^{ns}	0,044	0,475 ^{ns}	0,449 ^{ns}	0,010
Sal	2	0,948 ^{ns}	0,174 ^{ns}	0,378 ^{ns}	0,666 ^{ns}	0,007	0,032	0,710 ^{ns}	0,139 ^{ns}	0,365 ^{ns}
Lam	2	0,413 ^{ns}	0,178 ^{ns}	0,519 ^{ns}	0,759 ^{ns}	0,159 ^{ns}	0,944 ^{ns}	0,056 ^{ns}	0,342 ^{ns}	0,110 ^{ns}
Sal × Lam	4	0,867 ^{ns}	0,218 ^{ns}	0,112 ^{ns}	0,333 ^{ns}	0,113 ^{ns}	0,264 ^{ns}	0,582 ^{ns}	0,818 ^{ns}	0,109 ^{ns}
DMS (Tukey) entre Sal ou L		3,10	2,00	2,10	4,51	2,26	2,05	1,66	1,06	1,99
DMS (Dunnet)T0 vs S ou L		4,10	2,7	2,08	6,00	3,01	2,73	2,21	1,41	2,65
CV (%)		11,0	8,3	9,1	56,0	29,8	21,5	34,5	14,9	31,0
Médias		27,9	24,3	23,5	8,0	11,2	9,4	4,8	7,0	6,4
T0		25,8	23,4	25,0	12,0	12,4	11,5	4,2	6,6	3,8
S1		27,9	24,0	23,8	6,7	12,8a	9,8a	5,2	7,0	6,0
S2		28,1	23,9	22,6	7,5	9,8b	7,9*b	4,7	7,5	6,7*
S3		28,3	25,3	23,4	8,4	10,6b	9,9a	4,7	6,6	7,2*
L1		27,2	23,9	23,1	8,3	10,6	9,2	4,0	6,7	5,9
L2		28,4	25,3	23,9	7,0	10,6	9,1	5,7	7,1	6,4
L3		28,8	24,1	22,9	7,2	12,2	9,4	4,8	7,3	7,6*

FV = Fator de variância, GL = Grau de liberdade, PS1 = Período seco 1, PC = período chuvoso, PS2 = período seco 2, Fat = Médias dos tratamentos irrigados; DMS = diferença mínima significativa; CV = Coeficiente de variação; Sal= Salinidade da água de irrigação; Lam= Lâmina de irrigação; T0 = tratamento sem irrigação; ns = não há diferença significativa entre tratamentos; *Diferença significativa em relação ao tratamento controle (T0) pelo teste de Dunnett à 5% de probabilidade. Letras minúsculas iguais não diferem entre si para os níveis de salinidade pelo teste Tukey (p ≤ 0,05).

A hemicelulose, juntamente com a celulose, é degradada e fermentada por microrganismos anaeróbicos no rúmen para produzir ácidos graxos voláteis (AGV), principalmente acetato, propionato e butirato, que constituem fonte principal de energia a o ruminante. (Packett *et al.*, 1965; Solden *et al.*, 2017). Portanto, a redução da hemicelulose na forragem, determinada no tratamento irrigado com água salobra de $2,5 \text{ dS m}^{-1}$, impacta diretamente a produção de AGV e, consequentemente, o valor nutricional para ruminantes, prejudicando a eficiência alimentar devido a menor quantidade de energia metabolizável para o animal.

O estresse salino também influenciou na redução de HEM na forragem irrigada com água salobra de $2,5 \text{ dS m}^{-1}$, sugerindo redução da digestibilidade devido a redução da síntese e a deposição de AVG da parede celular para evitar a perda de água e diminuir o transporte de íons em excesso para dentro da planta mecanismos regulatórios que afetam a biossíntese e a deposição dos principais componentes da parede celular (Dabravolski; Isayenkov, 2023).

Não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos irrigados para o percentual de lignina (LDA). Contudo, em comparação ao controle, os tratamentos S2, S3 e L3 apresentaram percentuais superiores de LDA, como detalhado na figura 5. Os resultados indicam que uma redução na lâmina de irrigação até 66%ETc diminui a lignina e favorece a digestibilidade da forragem produzida para os ruminantes. A LDA é responsável pela resistência mecânica contra estresses ambientais, entretanto o aumento da lignina nas paredes celulares das plantas dificulta o acesso das enzimas microbianas aos polissacarídeos, reduzindo a degradação da fibra no rúmen e, consequentemente, na digestibilidade da fibra e do material seco (Ferreira *et al.*, 2021; Habermann *et al.*, 2019).

Por outro lado, o estresse salino a partir de $2,5 \text{ dS m}^{-1}$ também proporcionou aumento significativo no teor de LDA, o que desfavorece o teor nutricional da moringa nestas condições de cultivo. Este dado corrobora com diversos estudos que demonstram que tanto o estresse hídrico quanto o salino estimulam a produção e deposição da lignina na parede celular da planta,

protegendo-a da perda excessiva de água e mantendo seu potencial osmótico (Balasubramaniam *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2025).

Portanto, a interação entre estresse hídrico prolongado e a salinidade da água acima de 2,5 dS m⁻¹ promoveu alterações negativas na qualidade da fibra, aumentando significativamente o teor de lignina (LDA) e reduzindo o conteúdo de hemicelulose (HEM). A associação destes dois fatores sugere limitação do aproveitamento nutricional da forragem pelo ruminante, principalmente quando associado ao aumento de FDA. Mesmo assim, em regiões de escassez hídrica, a moringa se configura como uma forrageira proteica e energética promissora para a suplementação animal em regiões áridas e semiáridas, requerendo manejo de irrigação adequado para maximizar sua eficiência na alimentação de ruminantes.

4. CONCLUSÕES

O perfil nutricional da moringa, considerando o cultivo da moringa sob irrigação plena – S1L3 – no semiárido brasileiro, estão dentro da faixa obtida internacionalmente ao longo de anos, apresentando teores moderados de proteína e fibras, qualificando-a uma fonte relevante de nutrientes para suplementação animal.

A salinidade S2 favoreceu a produção de MS, entretanto verificou-se sua associação ao comprometimento da qualidade fibrosa (FDA, HEM e LDA). A adoção de lâminas deficitárias até 66%E_{Tc} integrada com água salobra de 2,5 dS m⁻¹ mostrou-se a estratégia de manejo eficiente para mitigar os efeitos negativos da salinidade sobre a parede celular e manter um perfil fibroso mais adequado para a alimentação de ruminantes.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, R.; ELSHARBASY, F.; FADLELMULA, A. Nutritional Values of *Moringa oleifera*, Total Protein, Amino Acid, Vitamins, Minerals, Carbohydrates, Total Fat and Crude Fiber, under the Semi-Arid Conditions of Sudan. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*, [s. l.], v. 10, p. 56–58, 2018.
- ABDOUN, K. et al. Cultivation and Uses of *Moringa oleifera* as Non-Conventional Feed Stuff in Livestock Production: A Review. *Life*, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 63, 2022.
- ABEBE, H.; TU, Y. Impact of Salt and Alkali Stress on Forage Biomass Yield, Nutritive Value, and Animal Growth Performance: A Comprehensive Review. *Grasses*, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 355–368, 2024.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, [s. l.], p. 711–728, 2013.
- AOAC. Association of Official Analytical Chemists International. *Official Methods of Analysis*, [s. l.], 2009.
- AYANFE, N. et al. Can high-lipid concentrates offset the high enteric methane production caused by high-forage diets fed to lactating dairy cows?. *Journal of Dairy Science*, [s. l.], v. 108, n. 8, p. 8350–8366, 2025.
- BALASUBRAMANIAM, T. et al. Plants' Response Mechanisms to Salinity Stress. *Plants*, [s. l.], v. 12, n. 12, p. 2253, 2023.
- BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. do N. *Experimentação Agrícola*. 4. ed. Brasil: Funep, 2013. Disponível em: <https://livraria.funep.org.br/product/experimentac-o-agricola-4-edic-o/>.
- BHRIJAVASI, G. et al. Underutilized fruit crops in semi-arid climates: Challenges, innovations, and future prospects. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, [s. l.], v. 8, n. 10, p. 488–496, 2024.
- BORAH, L.; HALOI, S. *Moringa oleifera* leaf as potential, alternative protein source for livestock. *Journal of Livestock Science*, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 141–149, 2024.
- CAMPOS, F. S. et al. Characterisation and Recovery of Minerals in Silages of Sorghum IPA 2502 Irrigated with Different Leaching Fractions of Brackish Water. *Grasses*, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 68–77, 2023.
- CATUNDA, K. L. M. et al. *Moringa oleifera*: an alternative forage of multiple uses for the Brazilian semiarid. *Científica*, [s. l.], v. 45, n. 4, p. 437, 2017.
- CHAUDHARY, M. N. et al. Effect of Feeding *Moringa oleifera* Replacing TMR on Nutrients Intake, Rumen Fermentation and Economics in Adult Cattle. *International Journal of Bio-resource and Stress Management*, [s. l.], v. 14, n. Nov, 11, p. 1518–1522, 2023.
- DA SILVA, M. F. et al. Assessing the potential of two alternative forage for saline semiarid regions in Brazil. *Discover Plants*, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 216, 2025.

- DA SILVA, R. R. et al. Ionic Response and Sorghum Production under Water and Saline Stress in a Semi-Arid Environment. *Agriculture*, [s. l.], v. 13, n. 6, p. 1127, 2023.
- DABRAVOLSKI, S. A.; ISAYENKOV, S. V. The regulation of plant cell wall organisation under salt stress. *Frontiers in Plant Science*, [s. l.], v. 14, p. 1118313, 2023.
- DELGADO, J.; VALDÉS-RODRÍGUEZ, O. Drying and protein content in *Moringa oleifera* Lam. leaves. *Agro Productividad*, [s. l.], 2025.
- FERREIRA, G. et al. Effect of drought stress on in vitro neutral detergent fiber digestibility of corn for silage. *Animal Feed Science and Technology*, [s. l.], v. 273, p. 114803, 2021.
- FERREIRA, J. F. S. et al. Spinach (*Spinacea oleracea* L.) Response to Salinity: Nutritional Value, Physiological Parameters, Antioxidant Capacity, and Gene Expression. *Agriculture*, [s. l.], v. 8, n. 10, p. 163, 2018.
- FRIZZONE, J. A. et al. Microirrigação: Gotejamento e Microaspersão. Maringá: EDUEM, 2012.
- GHEYI, H. R. et al. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. 2. ed. Fortaleza - CE: INCTSal, 2016.
- GRANELLA, S. J. et al. An approach to recent applications of *Moringa oleifera* in the agricultural and biofuel industries. *South African Journal of Botany*, [s. l.], v. 137, p. 110–116, 2021.
- GUIMARÃES, V. et al. The future of small ruminants in Brazil: lessons from the recent period and scenarios for the next decade. *Small Ruminant Research*, [s. l.], 2022.
- HABERMANN, E. et al. Warming and water deficit impact leaf photosynthesis and decrease forage quality and digestibility of a C4 tropical grass. *Physiologia Plantarum*, [s. l.], v. 165, n. 2, p. 383–402, 2019.
- HAFEZ, E. M. et al. Foliar-Applied Potassium Silicate Coupled with Plant Growth-Promoting Rhizobacteria Improves Growth, Physiology, Nutrient Uptake and Productivity of Faba Bean (*Vicia faba* L.) Irrigated with Saline Water in Salt-Affected Soil. *Plants*, [s. l.], v. 10, n. 5, p. 894, 2021.
- HEDAYATI-FIROOZABADI, A. et al. Forage yield and quality as affected by salt stress in different ratios of *Sorghum bicolor* - *Bassia indica* intercropping. *Journal of Plant Nutrition*, [s. l.], v. 43, n. 17, p. 2579–2589, 2020.
- HUSSEIN, S. M. et al. Screening Dietary Fat Sources and Concentrations Included in Low- and High-Forage Diets Using an In Vitro Gas Production System. *Fermentation*, [s. l.], v. 10, n. 10, p. 506, 2024.
- IBGE. Pesquisa da Pecuária Municipal 2023. [S. l.]: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html>. Acesso em: 14 set. 2025.
- IBRAHIMA, F.; KIRKPINAR, F. Chemical Characteristics and Feed Value of *Moringa oleifera* Leaves, Stalks and Whole Plant. *Hayvansal Üretim*, [s. l.], 2024.

INSA. Semiárido Brasileiro. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, [s. l.], 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/insa/pt-br/semiario-brasileiro>. Acesso em: 14 set. 2025.

JOY, F. et al. Effect of dietary lipid inclusion from by-product-based pellets on dry matter intake, ruminal fermentation, and nutrient digestion in finishing beef heifers. *Canadian Journal of Animal Science*, [s. l.], v. 101, n. 3, p. 481–492, 2021.

LEDRU, M.-P. et al. When archives are missing, deciphering the effects of public policies and climate variability on the Brazilian semi-arid region using sediment core studies. *Science of The Total Environment*, [s. l.], v. 723, p. 137989, 2020.

LEITANTHEM, V. K. et al. Impact of *Moringa oleifera* on rumen fermentation and methane emission under in vitro condition. *AMB Express*, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 141, 2022.

LEONE, A. et al. *Moringa oleifera* Seeds and Oil: Characteristics and Uses for Human Health. *International Journal of Molecular Sciences*, [s. l.], v. 17, n. 12, p. 2141, 2016.

LOBO, R. Opportunities for investment into small ruminant breeding programmes in Brazil. *Journal of animal breeding and genetics*, [s. l.], 2019.

MASITLHA, E. P.; SEIFU, E.; TEKETAY, D. Nutritional composition and mineral profile of leaves of *Moringa oleifera* provenances grown in Gaborone, Botswana. *Food Production, Processing and Nutrition*, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 3, 2024

MEDEIROS, J. F. Qualidade da água de irrigação e evolução da salinidade nas propriedades assistidas pelo “GAT” nos Estados do RN, PB e CE. 1992. 196 f. Dissertação - Universidade Federal da Paraíba - Campus II - Campina Grande, Campina Grande, 1992. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/jspui/handle/riufcg/2896>. Acesso em: 1 ago. 2021.

MEZA-HERRERA, C. et al. Small ruminants and sustainability in Latin America & the Caribbean: Regionalization, main production systems, and a combined productive, socio-economic & ecological footprint quantification. *Small Ruminant Research*, [s. l.], 2022.

MOKOBOKI, H. K. et al. Chemical composition, in vitro ruminal dry matter degradability and dry matter intake of some selected browse plants. *Cogent Food & Agriculture*, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 1587811, 2019.

MORSY, T. A. et al. Potential of *Moringa oleifera* silage to replace concentrate feed mixture in diet of lactating Damascus goats. *Annals of Animal Science*, [s. l.], v. 22, n. 4, p. 1373–1383, 2022.

PACKETT, L. V. et al. Influence of Hemicellulose A and B on Cellulose Digestion, Volatile Fatty Acid Production and Forage Nutritive Evaluation. *The Journal of Nutrition*, [s. l.], v. 85, n. 1, p. 89–101, 1965.

PATEL, S. et al. Effects of potassium and saline water irrigation on growth of maize plant. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, [s. l.], v. 11, n. 5, p. 195–201, 2022.

PONNAMPALAM, E. et al. Effects of Nutritional Factors on Fat Content, Fatty Acid Composition, and Sensorial Properties of Meat and Milk from Domesticated Ruminants: An Overview. *Animals*, [s. l.], v. 14, n. 6, p. 840, 2024.

RICHARDS, L. A. The diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington: U. S. Dept. Of Agriculture, 1969.

SÁNCHEZ, N. R.; LEDIN, S.; LEDIN, I. Biomass Production and Chemical Composition of *Moringa oleifera* under Different Management Regimes in Nicaragua. *Agroforestry Systems*, [s. l.], v. 66, n. 3, p. 231–242, 2006.

SILVA, G. M. D. et al. Avaliação de forrageiras tropicais: Revisão. *Pubvet*, [s. l.], v. 10, n. 03, 2016. Disponível em: <https://ojs.pubvet.com.br/index.php/revista/article/view/1484>. Acesso em: 25 nov. 2025.

SILVA, C. D. S. et al. Fermentative Characteristics, Nutritional Aspects, Aerobic Stability, and Microbial Populations of Total Mixed Ration Silages Based on Relocated Sorghum Silage and Cactus Pear for Sheep Diets. *Agronomy*, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 506, 2025.

SILVA, A.; ARNAN, X.; MEDEIROS, P. Climate change may alter the availability of wild food plants in the Brazilian semiarid. *Regional Environmental Change*, [s. l.], v. 24, 2024.

SIMBAYA, J.; CHIBINGA, O.; SALEM, A. Nutritional evaluation of selected fodder trees: Mulberry (*Morus alba* Lam.), *Leucaena* (*Leucaena leucocephala* Lam de Wit.) and *Moringa* (*Moringa oleifera* Lam.) as dry season protein supplements for grazing animals. *Agroforestry Systems*, [s. l.], v. 94, p. 1189–1197, 2020.

SOARES, M. O. et al. Challenges and perspectives for the Brazilian semi-arid coast under global environmental changes. *Perspectives in Ecology and Conservation*, [s. l.], v. 19, n. 3, p. 267–278, 2021.

SOBRAL, A. J. S.; MUNIZ, E. N.; SILVA, C. M. Caracterização da *Moringa oleifera* Lam e sua utilização na alimentação animal. *Ciência Animal*, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 68–79, 2020.

SOLDEN, L. M. et al. New roles in hemicellulosic sugar fermentation for the uncultivated *Bacteroidetes* family BS11. *The ISME Journal*, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 691–703, 2017.

SONI, P. G. et al. Effect of deficit saline irrigation, tillage and rice straw mulch in wheat-sorghum cropping system on yield and nutritive value of rainfed forage sorghum in salt-affected soils. *Land Degradation & Development*, [s. l.], v. 34, n. 17, p. 5635–5646, 2023.

SOUSA, G. G. D. et al. Nutrição mineral e extração de nutrientes de planta de milho irrigada com água salina. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, [s. l.], v. 14, n. 11, p. 1143–1151, 2010.

SOUZA, R. O. R. M.; BOTREL, A. T. Modelagem para o dimensionamento de microtubos em irrigação localizada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 16–22, 2004.

SU, B.; CHEN, X. Current Status and Potential of *Moringa oleifera* Leaf as an Alternative Protein Source for Animal Feeds. *Frontiers in Veterinary Science*, [s. l.], v. 7, p. 53, 2020.

TEIXEIRA, E. M. B. et al. Chemical characteristics and fractionation of proteins from *Moringa oleifera* Lam. leaves. *Food chemistry*, [s. l.], v. 147, 2014.

TEIXEIRA, P. C. et al. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Rio de Janeiro-RJ: EMBRAPA Solos, 2017.

VALDIVIÉ-NAVARRO, M. et al. Review of Moringa oleifera as forage meal (leaves plus stems) intended for the feeding of non-ruminant animals. *Animal Feed Science and Technology*, [s. l.], v. 260, 2020.

VAN SOEST, P. J.; ROBERTSON, J. B.; LEWIS, B. A. Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition. *Journal of Dairy Science*, [s. l.], v. 74, n. 10, p. 3583–3597, 1991.

WANG, Y. et al. Integrated metabolome and transcriptome analysis of maize roots response to different degrees of drought stress. *BMC Plant Biology*, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 505, 2025.

YANG, H.; SHUKLA, M. K.; DU, T. Assessment of plant mineral nutrition concentrations of tomato irrigated with brackish water and RO concentrate. *Journal of Plant Nutrition*, [s. l.], v. 46, n. 19, p. 4639–4656, 2023.

CONCLUSÃO GERAL

Esta tese demonstrou o potencial forrageiro da *moringa oleífera* Lam. cultivada sob estresses abióticos no semiárido brasileiro como estratégia alimentar na alimentação de ruminantes na região. A aplicação de manejo sustentável, controlando adequadamente salinidade e sodicidade, favoreceu o equilíbrio de sais do solo, demonstrando a relevância do uso de fontes de águas não classificadas para uso humano como oportunas para produção de alimento proteicos utilizados na suplementação alimentar dos animais no Nordeste do Brasil. A suspensão da irrigação deficitária no período chuvoso anual não comprometeu sua produtividade e favoreceu a lixiviação dos sais depositados no solo com a irrigação do período seco, tornando-a uma técnica de manejo irrigado importante para efetivação da segurança hídrica em sistemas de produção resilientes na região. Os resultados confirmaram a viabilidade técnica do uso de águas deficitárias para irrigar a moringa a partir de 33%ETc sem prejuízo no crescimento vegetativo, e a partir de 66%ETc para produção efetiva de forragem (caule+folha). A bromatologia da forragem produzida reforçou a qualidade nutricional da espécie diante dos estresses morfofisiológicos submetidos, sendo recomendado seu cultivo a partir de lâminas deficitárias até 66%ETc e água salobra até 2,5dS m⁻¹, qualificando-a como importante fonte nutricional para aumentar a produção animal em áreas tropicais e garantir a segurança alimentar nos períodos secos. Portanto, os resultados desta pesquisa qualificaram a moringa como uma planta tolerante a condições moderadas de salinidade até 2,5dS m⁻¹, o que viabiliza seu cultivo em regiões com escassez hídrica e disponibilidade limitada de água de boa qualidade como alternativa sustentável para sistemas agrícolas em ambientes semiáridos e possibilidade suplementação alimentar para animais na região.