

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE DOUTORADO**

**BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO NA
NUTRIÇÃO E PRODUÇÃO DE PALMA FORRAGEIRA
(*Opuntia ficus-indica* Mill.) SOB DIFERENTES
CONDIÇÕES DE CULTIVO**

Marcos de Souza Rodrigues

**CRUZ DAS ALMAS - BAHIA
JULHO – 2025**

**BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO NA NUTRIÇÃO E
PRODUÇÃO DE PALMA FORRAGEIRA (*Opuntia ficus-indica* Mill.)
SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE CULTIVO**

Marcos de Souza Rodrigues
Bacharel em Agronomia, UFRB, 2018

Tese apresentada ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito para a obtenção do Título de Doutor em Ciências Agrárias (Área de Concentração: Agricultura Tropical).

Orientador: Prof. Dr. Ossival Lolato Ribeiro
Coorientadora: Profa. Dra. Ana Cristina Fermino Soares

**CRUZ DAS ALMAS - BAHIA
JULHO – 2025**

FICHA CATALOGRÁFICA

R696b	<p>Rodrigues, Marcos de Souza. Bactérias promotoras de crescimento na nutrição e produção de palma forrageira (<i>Opuntia ficus-indica</i> Mill.) sob diferentes condições de cultivo / Marcos de Souza Rodrigues._ Cruz das Almas, BA, 2025. 75f.: il.</p> <p>Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias Ambientais e Biológicas, Doutorado em Ciências Agrárias.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Ossival Lolato Ribeiro. Coorientadora: Prof. Dra. Ana Cristina Fermino Soares.</p> <p>1.Plantas forrageiras – Bactérias – Crescimento (Plantas). 2.Plantas forrageiras – Regiões Áridas – Análise. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias Ambientais e Biológicas. II.Título.</p> <p style="text-align: right;">CDD: 633.202</p>
-------	---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE DOUTORADO**


**BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO NA NUTRIÇÃO E
PRODUÇÃO DE PALMA FORRAGEIRA (*Opuntia ficus-indica* Mill.)
SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE CULTIVO**

Comissão Examinadora da Defesa de Tese de

Marcos de Souza Rodrigues

30 de julho de 2025


Documento assinado digitalmente

 **OSSIVAL LOLATO RIBEIRO**
Data: 23/09/2025 07:55:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ossival Lolato Ribeiro
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB

Orientador

Documento assinado digitalmente


 **TOSHIK IARLEY DA SILVA**
Data: 23/09/2025 12:39:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Toshik Iarley da Silva
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB
Examinador Interno

Assinado eletronicamente por:
Danilo Jefferson Romero
CPF: ***.568.023-**
Data: 22/09/2025 21:58:28 -03:00

Prof. Dr. Danilo Jefferson Romero
Universidade SENAI CIMATEC – SENAI CIMATEC
Examinador Externo


Documento assinado digitalmente

 **ALEXANDRE FERNANDES PERAZZO**
Data: 23/09/2025 13:31:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Perazzo
Universidade Federal do Piauí – UFPI

Examinador Externo

Documento assinado digitalmente

 **MAURICIO DA SILVA AMORIM**
Data: 23/09/2025 08:14:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Mauricio da Silva Amorim
Instituto Federal do Pará – IFPA
Examinador Externo

DEDICATÓRIA

Dedico essa tese a minha esposa Poliane Guimarães Santos Araujo, meus pais, Manoel Candido Filho e Lucimar Maria de Souza e aos meus irmãos Márcia Souza Rodrigues e Maic Souza Rodrigues, pelo fim dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me permitido viver o sonho de realizar uma pós-graduação e ter me amparado durante todos esses anos. Agradeço a minha esposa Poliane, pela atenção e pelo suporte e dedicação e por me dar apoio nos momentos mais difíceis no decorrer do experimento e meus pais, Manoel e Lucimar, por todo carinho e amor que eles têm por mim e por serem meus mais importantes amigos. Amo muito vocês! A meus irmãos Márcia e Maic, por todo apoio durante esse longo período de pós-graduação.

A meu orientador, professor Dr. Ossival Lolato Ribeiro pelo aceite da orientação, pela atenção e pelo suporte e dedicação e por me dar apoio nos momentos mais difíceis no decorrer do experimento. A minha orientadora Professora Dra Ana Cristina Fermino Soares, por ter me auxiliado em todos os meus trabalhos, além de ser grande amiga na vida. Muito obrigado por todos os conselhos profissionais e pessoais durante todos esses anos!

À Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias por me acolher durante esses anos de luta e dedicação, me proporcionando conhecimentos valiosos e experiências extraordinárias, para minha vida profissional. À CAPES-Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão de bolsa e a CNPq-Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

A todos meus amigos que passaram e continuaram em minha vida durante todos esses anos e que de alguma forma me ajudaram a conquistar essa etapa da vida.

Muito obrigado!

EPIGRAFE

“Nas grandes batalhas da vida, o primeiro passo para a vitória é o desejo de vencer!”(Mahatma Gandh).

BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO NA NUTRIÇÃO E PRODUÇÃO DE PALMA FORRAGEIRA (*Opuntia ficus-indica* Mill.) SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE CULTIVO

RESUMO GERAL

Diversas plantas forrageiras têm o mecanismo de tolerância às condições de estresse por déficit hídrico, no entanto, a tolerância varia de acordo com cada espécie. Portanto, são necessários estudos para o desenvolvimento de tecnologias capazes de tornar as plantas mais resistentes a esse fator, promovendo assim o melhor desenvolvimento e produtividade. O uso de tecnologias como a inoculação de bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP) pode promover o aumento no crescimento de plantas forrageiras sob condições de estresse hídrico. Dessa forma, este estudo teve por objetivo avaliar o efeito da inoculação de bactérias promotoras do crescimento de plantas (BPCP) em palma forrageira (*Opuntia ficus indica* (L.) Mill), cv. *Gigante*, os parâmetros morfológicos e produção da cultura em condições controladas e em condições de campo, em sequeiro. Dois experimentos foram conduzidos, um em ambiente protegido (casa de vegetação) e outro em campo, ambos utilizando delineamento inteiramente casualizado, com cinco tratamentos bacterianos: controle (sem inoculação), *Azospirillum brasilense* Ab-V5, *A. brasilense* Ab-V6, *Rhizobium tropici* e *Bacillus subtilis*, avaliados ao longo de 10 a 12 períodos (de 30 a 510 dias após o plantio). Os resultados indicaram que a inoculação com BPCPs influenciou positivamente características morfológicas como número e comprimento dos cladódios, massa fresca e seca, além de melhorar os teores de macro e micronutrientes nas plantas. Destaque foi dado às estirpes *Azospirillum brasilense* Ab-V6 e *Bacillus subtilis*, que promoveram maior acúmulo de biomassa e melhor estado nutricional das plantas, inclusive com redução de sódio em ambientes protegidos. No campo, *B. subtilis* também apresentou efeito significativo na emissão de cladódios. Embora algumas variáveis, como largura dos cladódios, não tenham respondido à inoculação, o tempo de avaliação foi determinante para o acúmulo de biomassa, evidenciando crescimento progressivo ao longo dos dias. O uso de BPCPs representa uma estratégia eficiente, de baixo custo e ambientalmente sustentável para promover o crescimento e a produtividade da palma forrageira em condições limitantes, contribuindo para a resiliência dos sistemas produtivos frente aos desafios climáticos e edáficos do semiárido.

Palavras-chave: Bactérias endofíticas, Inoculantes Biológicos, Produtividade, Qualidade ambiental.

PLANT GROWTH-PROMOTING BACTERIA IN THE NUTRITION AND PRODUCTION OF FORAGE CACTUS (*Opuntia ficus-indica* Mill) UNDER DIFFERENT CULTIVATION CONDITIONS

GENERAL ABSTRACT

Several forage species possess mechanisms of tolerance to water deficit stress; however, the degree of tolerance varies among species. Therefore, studies are needed to develop technologies capable of enhancing plant resilience, improving development and productivity. One technology is plant growth-promoting bacteria (PGPB), which can enhance the growth of forage species under water-limited conditions. This study aimed to evaluate the effect of PGPB inoculation on the morphological parameters and yield of forage cactus (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.), cv. Gigante, under both controlled (greenhouse) and field (rainfed) conditions. Two experiments were conducted using a completely randomized design with five bacterial treatments: control (no inoculation), *Azospirillum brasilense* Ab-V5, *A. brasilense* Ab-V6, *Rhizobium tropici*, and *Bacillus subtilis*, evaluated across 10 to 12 time points (from 30 to 510 days after planting). The results showed that PGPB inoculation positively influenced morphological traits such as the number and length of cladodes, fresh and dry biomass, and improved macro- and micronutrient content in the plants. The strains *Azospirillum brasilense* Ab-V6 and *Bacillus subtilis* were particularly effective, promoting greater biomass accumulation and improved nutritional status, including reduced sodium levels under protected conditions. In the field, *B. subtilis* also significantly increased cladode emissions. Although some variables, such as cladode width, did not respond to inoculation, the evaluation period was crucial for biomass accumulation, indicating progressive growth over time. The use of PGPB represents an effective, low-cost, and environmentally sustainable strategy to enhance the growth and productivity of forage cactus under limiting conditions, contributing to the resilience of production systems facing the climatic and edaphic challenges of semi-arid regions.

Keywords: Endophytic bacteria; Biological inoculants; Productivity; Environmental quality.

SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO GERAL.....	11
2.0	REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1	Palma Forrageira.....	13
2.2	Bactérias promotoras de crescimento em plantas.....	17
2.3	Influência de bactérias promotoras de crescimento de plantas na Palma Forrageira	22
2.4	Importância das bactérias promotoras de crescimento de plantas nos atributos químicos e físicos do solo.....	24
3.0	REFERÊNCIAS.....	28
	CAPÍTULO 1 – Bactérias promotoras do crescimento e nutrição em palma forrageira em ambiente protegido.....	35
	RESUMO.....	36
	ABSTRACT.....	37
1.0	INTRODUÇÃO.....	38
2.0	MATERIAL E MÉTODOS.....	39
3.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
4.0	CONCLUSÕES.....	50
5.0	REFERÊNCIAS.....	51
	CAPÍTULO 2 - Produção e nutrição de palma forrageira com uso de bactérias promotoras de crescimento de plantas em campo de cultivo.....	55
	RESUMO.....	56
	ABSTRACT.....	57
1.0	INTRODUÇÃO.....	58
2.0	MATERIAL E MÉTODOS.....	59
3.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
4.0	CONCLUSÕES.....	71
5.0	REFERÊNCIAS.....	71

1. INTRODUÇÃO GERAL

A palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill.) é uma cactácea amplamente cultivada em regiões semiáridas devido à sua notável capacidade de adaptação a condições edafoclimáticas adversas, como escassez hídrica e solos de baixa fertilidade e seu elevado potencial produtivo (ARAÚJO et al., 2023; QUEIROGA et al., 2020). Representa uma das principais alternativas alimentares para ruminantes durante os períodos de estiagem, garantindo a continuidade da produção pecuária mesmo em cenários de escassez de forragem (SANTOS et al., 2024). Além disso, tem ganhado destaque por seu potencial na alimentação humana, sendo rica em fibras, minerais e compostos antioxidantes, com aplicações na indústria alimentícia e farmacêutica (BELHADJ SLIMEN; NAJAR; ABDERRABBA, 2020; ARAÚJO et al., 2021; DUBEUX et al., 2021; DE- SILVA et al., 2023).

Seu cultivo exerce papel estratégico na geração de renda, na segurança alimentar (QUEIROGA et al., 2020; ARAÚJO et al., 2021; NÓBREGA et al., 2021) e na manutenção da atividade agropecuária familiar, especialmente no Semiárido brasileiro, onde a agricultura de base familiar depende fortemente de recursos adaptados às condições locais (ALBUQUERQUE et al., 2019). Dessa forma, a palma forrageira possui grande relevância econômica e social, contribuindo para o fortalecimento da agricultura sustentável e para a resiliência das comunidades rurais frente às mudanças climáticas (TOIT et al., 2018; QUEIROGA et al., 2020).

No entanto, o cultivo intensivo da palma exige o desenvolvimento de estratégias que promovam maior eficiência nutricional e produtividade principalmente em áreas com recursos naturais limitados (MACÊDO et al., 2020; JUNIOR et al., 2021; PESSOA et al., 2022). Nesse contexto, as bactérias promotoras do crescimento de plantas (BPCP) têm se destacado como uma alternativa promissora para a agricultura sustentável. Essas bactérias atuam por diferentes mecanismos, como fixação biológica de nitrogênio, solubilização de fósforo, produção de fitohormônios e indução de resistência a estresses bióticos e abióticos (GUIMARÃES et al., 2017; FUKAMI et al., 2017; OLANREWAJU et al., 2017; BARBOSA et al., 2022; LOPES et al., 2021). A aplicação de BPCP pode favorecer o crescimento vegetal, aumentar a eficiência de uso de nutrientes e reduzir a dependência de insumos químicos (MAMÉDIO et al., 2020), promovendo

ganhos agronômicos, econômicos e ambientais.

Estudos com palma forrageira inoculada com BPCP, em diferentes condições de cultivo, como ambientes protegidos e campo aberto, são fundamentais para compreender a eficiência dessas interações em distintos contextos. A avaliação integrada dos efeitos morfológicos e nutricionais da inoculação bacteriana permite identificar estratégias de manejo mais sustentáveis e resilientes, contribuindo para a segurança alimentar e forrageira em regiões semiáridas (SILVA et al., 2015; LYRA et al., 2016; MAMÉDIO et al., 2020; FREITAS et al., 2019; CELESTINO, 2019).

Diante da necessidade de tecnologias sustentáveis que aumentem a produtividade e a eficiência nutricional da palma forrageira, este estudo se justifica pela importância de avaliar o potencial das bactérias promotoras de crescimento sob diferentes condições de cultivo, visando ampliar sua aplicação prática e os benefícios agroecológicos e socioeconômicos associados. Para avaliar o potencial de bactérias promotoras de crescimento na nutrição e produção de palma forrageira sob diferentes condições de cultivo, este trabalho teve como objetivos: 1- Avaliar o efeito de bactérias promotoras do crescimento e nutrição em palma forrageira em ambiente protegido e 2- Avaliar a Produção e nutrição de palma forrageira com uso de bactérias promotoras de crescimento de plantas em campo de cultivo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Palma Forrageira

A palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill) é uma angiosperma pertencente à divisão Embryophyta, classe Dicotyledoneae, ordem Opuntiales da família Cactaceae (SANTOS; DOS SANTOS, 2018; FREITAS, 2021; DA CRUZ, 2021). Originada nas Américas, nativa do México, a planta de ocorrência natural na forma silvestre, passou a ser domesticada e difundida no Mediterrâneo, África, Ásia e Oceania (MACÊDO et al., 2020; JUNIOR et al., 2021).

No Brasil, a palma foi introduzida por colonizadores portugueses para produção têxtil, devido a sua coloração carmim, produzida pelo inseto *Dactylopius coccus* (cochonilha do carmim) parasita natural (MACÊDO et al., 2020; QUEIROGA et al., 2020). O elevado valor econômico pago na Europa pelo corante, despertou o interesse da coroa portuguesa que vislumbrava a produção nas terras recém adquiridas brasileiras, administradas pela coroa (SANTOS; DOS SANTOS, 2018; FREITAS, 2021). Após a criação de corantes sintéticos, a produção do corante carmim foi esquecida, fazendo com que plantas fossem abandonadas nos campos. Sua posterior perpetuação ocorreu de forma natural ao longo da história (QUEIROGA et al., 2020).

Dotada de mecanismos fisiológicos que permitiam se adaptar às condições ecológicas das zonas áridas e semiáridas do mundo, tornou-se muito fácil a adaptação da palma no semiárido do Nordeste brasileiro (QUEIROGA et al., 2020; BARROS, 2022). Devido as secas que assolavam as regiões, haviam poucas opções para alimentação dos ruminantes, como de costume, os produtores ofertavam cactáceas nativas como mandacaru (*Cereus jamacaru*) e facheiro (*Pilosocereus pachycladus*), até observarem em pequenas plantações já estabelecidas a procura insistente por bovinos, caprino e ovinos (CARMO, 2019; MACÊDO et al., 2020). Desta forma, a planta passou a ser estabelecida como forrageira, sendo utilizada por criadores de animais em larga escala (FREITAS, 2021).

A família cactaceae apresenta cerca de 100 gêneros e 1850 espécies relatadas, estudos moleculares apontam sua origem na América do Sul na região norte central dos Andes no Chile, noroeste da Argentina, Bolívia e Peru, onde se concentra a maior diversidade de espécies endêmicas já relatadas (NYFFELER; EGGLI, 2010; SIMÕES; ZAPPI; AONA, 2020). No Nordeste Brasileiro o cultivo para

finalidade forrageira começou no início do século XX, onde são encontrados três tipos distintos de palma forrageira, a gigante (*Opuntia ficus indica*), a redonda (*Opuntia* sp.) e a miúda (*Opuntia conchenilifera*) (MACÊDO et al., 2020; QUEIROGA et al., 2020; FREITAS, 2021).

De modo geral, a palma é um cacto suculento com crescimento arbóreo de 1,5 a 5 metros de altura, perene, rústica e resistente a seca (DA CRUZ, 2021). O caule pode variar de 60 a 150cm de largura, ramos clorofilados achatados com comprimento variando de 30 a 60cm e largura de 6 a 15 cm, com possibilidade de superfície densamente espinhosa ou desprovidas de espinhos (CARMO, 2019; PESSOA et al., 2022). As raquetes (cladódios) podem apresentar diferentes tamanhos a depender da espécie, responsáveis pela fotossíntese, seu crescimento é definido pela ordem de surgimento dos cladódios (DUBEUX et al., 2021; BARROS, 2022). Com enraizamento superficial, os cladódios são os responsáveis pela sustentação da planta e distribuição de nutrientes e água para os demais órgãos, as células epidérmicas são revestidas por uma cutícula de natureza graxa, com espessura relativamente grossa, responsável por processos hídricos e térmicos, controlando a evaporação na superfície dos cladódios, refletindo a radiação solar e consequentemente reduzindo a temperatura do caule (MACÊDO et al., 2020; QUEIROGA et al., 2020).

Caracterizada como uma cultura semi perene de colheita bienal, a propagação ocorre por via sexuada e assexuada, sendo a propagação vegetativa por cladódio, a mais utilizada. A colheita é realizada manualmente, quando os palméis atingem idade entre 1 a 2 anos (SANTOS; DOS SANTOS, 2018; PESSOA et al., 2022). A espécie apresenta metabolismo ácido crassuláceo (MAC ou CAM- do inglês Crassulacean Acid Metabolism), adaptado as condições semiáridas, a planta é capaz de fechar os estômatos durante o dia para evitar a evaporação da água e CO₂ e abri-las durante a noite, quando as temperaturas baixam e a perda de água são menores, podendo assim capturar o CO₂ necessário para o seu metabolismo (JÚNIOR et al., 2018; MACÊDO et al., 2020; JUNIOR et al., 2021).

A rusticidade da palma é um fator preponderante para a sobrevivência em ambientes hostis, permitindo que a planta obtenha desenvolvimento satisfatório em regiões com baixos índices pluviométricos (CARMO, 2019; JÚNIOR et al., 2018). Destacando-se pela elevada eficiência no uso da água, com proporção de

aproximadamente 50 kg de água para cada quilograma de massa seca produzida (50:1), enquanto plantas C3 e C4 apresentam 1000:1 e 500:1, respectivamente (SAMPAIO; MENEZES, 2002; MARQUES et al., 2017; JÚNIOR et al., 2018; MACÊDO et al., 2020). Em cultivos adensados a produtividade pode chegar a 220t ha⁻¹ de biomassa verde em dois anos, proporcionando um maior incremento de nutrientes acumulados, como o nitrogênio variando de 134 a 300kg ha⁻¹ (BARROS, 2022).

Muito embora a palma apresente capacidade de adaptação à diferentes condições edafoclimáticas, a planta precisa estar concentrada em regiões com temperaturas médias variando de 16,1°C a 25,4°C, com máximas entre 28,5 e 31,5°C e mínimas de 8,6 a 20,4°C para que atinja a capacidade máxima produtiva da cultura. Os índices de precipitação devem variar entre 368,4 mm e 812,4 mm anual, e em condições extremas 200mm (CARMO, 2019; JUNIOR et al., 2021). O cultivo ainda apresenta exigências quanto as propriedades químicas e físicas do solo, sendo indicado para áreas com boa fertilidade, textura arenosa à argilosa, com drenagem eficiente e pH de 5,5 a 7,5 (DA CRUZ, 2021; JUNIOR et al., 2021). Devido a exigência na fertilidade principalmente em potássio (K) cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e a alta extração desses nutrientes, se faz necessário em cultivos de larga escala a adubação (MACÊDO et al., 2020; PESSOA et al., 2022).

A composição química pode variar de acordo com a espécie, idade da planta, nível de fertilidade do solo e espaçamento adotado (DUBEUX et al., 2021). De modo geral, a planta é rica em carboidratos solúveis (72 ± 536g kg⁻¹), proteína bruta (48 ± 12 g kg⁻¹), matéria mineral (126 ± 42 g kg⁻¹), fibra em detergente neutro – FDN (256 ± 27 g kg⁻¹) e fibra em detergente ácido – FDA (169 ± 39 g kg⁻¹) (SANTOS; DOS SANTOS, 2018; LOPES et al., 2019). Quanto aos teores de minerais quando comparadas a outras espécies forrageira, há uma alta concentração de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) e níveis baixos de sódio (Na) e fósforo (P) e grandes quantidades de vitamina E (SILVA, et al., 2021). Embora, quando desidratada constitua um excelente concentrado energético e apresente uma alta palatabilidade e grandes quantidades de carboidratos solúveis, a planta apresenta baixos teores de matéria seca e proteínas fibrosas (SANTOS; DOS SANTOS, 2018; FREITAS, 2021).

Ainda que haja um elevado teor de água na palma forrageira que atende a maior parte das necessidades de ingestão da água dos animais, seu uso em grandes proporções ou de forma exclusiva para a alimentação de ruminantes podem causar

distúrbios metabólicos como a diarreia, baixa ruminação e variação negativa no peso dos animais (LOPES et al., 2019; MACÊDO et al., 2020). Os distúrbios ocorrem devido à falta de fibras suficientes para manter as condições adequadas das funções ruminais, devendo esta, ser fornecida dentro de uma dieta que equacione os baixos teores de fibras e proteínas, tendo em vista que, o indicado para ruminantes são de 6 a 7% de proteína bruta (SANTOS; DOS SANTOS, 2018; QUEIROGA et al., 2020).

Dado o alto valor energético da forrageira, e a alta palatabilidade, ela pode substituir o milho e ser fornecida como alimento em sistema de pastejo, fatiada, fresca, em forma de silagem ou como componente de dieta completa com feno, restolho de sorgo, milho, feijão ou capim seco (LOPES et al., 2019; MACÊDO et al., 2020. DUBEUX et al., 2021). A adequação dos teores de proteína, bem como o equilíbrio nutricional, tem surgido efeito com associação a outros componentes como a cama de frango, silagem de sorgo e farelo de soja, resultando em ganhos de peso que variam de 580 a 1200 g dia⁻¹ em ruminantes (SANTOS; DOS SANTOS, 2018; QUEIROGA et al., 2020). A elevada umidade oriunda da palma, atende grande parte da necessidade de ingestão (líquida) de água dos animais em períodos de seca. Ruminantes alimentados com palma forrageira apresentam aumento do volume urinário, não somente pela alta umidade ingerida na dieta como a presença de minerais com efeitos diuréticos como o potássio (K) e magnésio (Mg) (CARMO, 2019; DUBEUX et al., 2021).

No segmento industrial, a palma é destinada para fins fármacos, alimentícios e cosméticos, atuando como uma rica fonte de matéria prima, para a produção de farinhas, geleias, biopolímeros e biogás (BELHADJ SLIMEN; NAJAR; ABDERRABBA, 2020). Considerando as propriedades químicas, têm-se fármacos para tratamento de úlceras, atividade inflamatória, capacidade neuroprotetora e nas propriedades antidiabéticas, hepatoprotetora e antioxidante (KAUR et al., 2012; SILVA et al., 2021). Nos cosméticos, há a produção de shampoo, sabonetes e cremes (QUEIROGA et al., 2020). Ainda que pouco utilizada no Brasil, no México, Chile e Peru, onde a produção é mais consolidada, o consumo da forrageira não se restringe apenas aos animais (MACÊDO et al., 2020). No segmento alimentício, a fruta da palma é designada para a produção de polpa, sucos concentrados, frutos secos desidratados e bebidas lácteas e alcoólicas (DUBEUX et al., 2021; CRUZ, 2021).

No Brasil, para as regiões produtoras, a palma desempenha um importante

papel na estratégia de convivência com a seca, como oferta alternativa para alimentação animal e como fonte de renda das atividades agropecuárias, elevando áreas em processos de desertificação (DUBEUX et al., 2021; QUEIROGA et al., 2020; BARROS 2022). A pouca exigência de água e energia, torna o cultivo relevante não apenas para regiões com problemas ambientais que sofrem com a falta de recurso, mas um importante aliado no desenvolvimento de sistemas de produção intensiva com baixo impacto ambiental (DUBEUX et al., 2021; JUNIOR et al., 2021). O desempenho da forrageira aumenta a viabilidade e a eficiência econômica para pequenos e médios agricultores de baixa renda, que buscam produzir para subsistência ou para maior comercialização (CARMO, 2019; QUEIROGA et al., 2020).

2.2 Bactérias promotoras de crescimento em plantas

O solo está repleto de microrganismos complexos que incluem bactérias, fungos, actinomicetos, protozoários e algas. Destes, as bactérias são as mais comuns, correspondendo a 95% das formas de vida existentes, influenciando diretamente na dinâmica do ecossistema solo (RAMAKRISHNA; YADAV; LI, 2019).

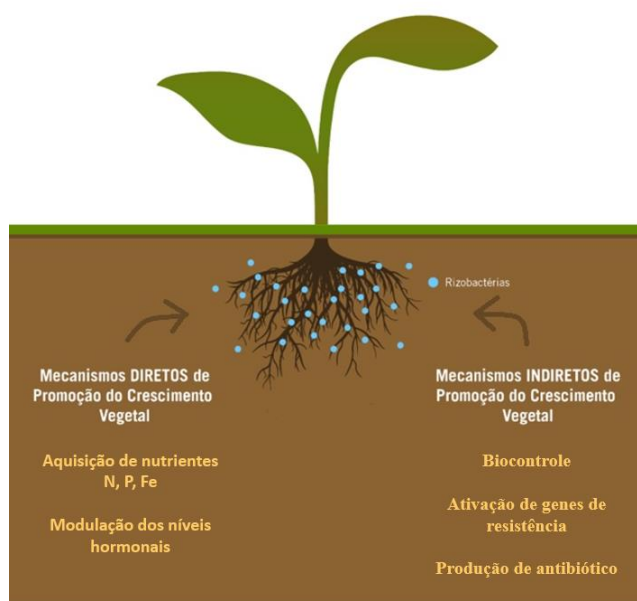
Desde a elaboração do conceito de rizosfera por Lorenz Hiltner (1904), foram relatados diversos estudos sobre o ambiente do solo ligado ao sistema radicular, sendo conhecido como rizosfera e abundante em atividade microbiana (COMPANT; CLÉMENT; SESSITSCH, 2010). Neste, há uma interação constante entre os microrganismos e as plantas, promovendo processos de sinalização e troca de materiais, envolvendo mecanismos de consequência neutra, sinérgica ou negativa, de grande importância para os envolvidos (RAMAKRISHNA; YADAV; LI, 2019; MAJEED; MUHAMMAD; AHMAD, 2018).

Dentre os microrganismos presentes na rizosfera têm-se as bactérias promotoras de crescimento em plantas (BPCP) ou ainda, as rizobactérias promotoras de crescimento de plantas (RPCP) que ocupam uma posição chave no ecossistema natural, podendo estimular o crescimento vegetal, aumentar o rendimento da cultura, reduzir infecções por patógenos, bem como estresses, sem conferir patogenicidade (SAHARAN; NEHRA, 2011; MAJEED; MUHAMMAD; AHMAD, 2018). As BPCP incluem microrganismos de vida livre ou epifíticos que colonizam tanto a região rizosférica como o tecido interno dos vegetais (COMPANT; CLÉMENT; SESSITSCH,

2010) com motilidade guiada por mecanismos de localização quimiotática para açúcares, aminoácidos, ácidos orgânicos, compostos aromáticos e moléculas exsudadas pelas raízes (GLICK, 2012; GUIMARÃES et al., 2017; SILVA, et al., 2021).

Em circunstâncias ideais as plantas apresentam crescimento e desenvolvimento linear, mas em condições de campo, elas podem ser submetidas a diversos estresses não letais que incluem temperaturas extremas, inundações, secas constantes, metais tóxicos, salinidade e patógenos que limitam seu crescimento (SAHARAN; NEHRA, 2011; GLICK, 2012). Quando empregada, as bactérias promotoras de crescimento utilizam de diferentes mecanismos para superar as limitações no crescimento (Figura 1).

Figura 1. Visão geral dos mecanismos envolvidos na promoção de crescimento de plantas por rizobactérias. Mecanismos diretos e indiretos envolvidos na promoção de crescimento.



Fonte: Adaptado de Figueredo, 2018.

O mecanismo direto envolve a aquisição de recursos e a modulação dos níveis hormonais vegetais, com destaque para as auxinas, giberelinas e citocininas, com redução da expressão do ácido abscísico (GUIMARÃES et al., 2017; RAMAKRISHNA; YADAV; LI, 2019). De outra forma, os mecanismos indiretos incluem a inibição de vários patógenos que prejudicam o crescimento e desenvolvimento da planta (FIGUEREDO, 2018).

No mecanismo direto as bactérias ofertam nutrientes através da solubilização

de fosfatos orgânicos e inorgânicos, do incremento na atividade de óxido nítrico envolvido na fixação biológica de nitrogênio e sequestro de ferro do solo (FIGUEREDO, 2018; MAJEED; MUHAMMAD; AHMAD, 2018), contribuindo para o desenvolvimento vegetal e aumentando as condições de tolerância ao estresse da planta.

Assim como ocorre com os nutrientes, os fitormônios são fundamentais para o crescimento e desenvolvimento das plantas e na resposta ao ambiente (SAHARAN; NEHRA, 2011). Naturalmente, a planta já apresenta mecanismos capazes de modular seu metabolismo para superar estresses não letais que limitam o seu crescimento, ajustando os níveis de fitormônios endógenos (GLICK, 2012; GUIMARÃES et al., 2017). Da mesma maneira, têm-se as BPCP, capazes de produzir e ajustar os fitormônios afetando o equilíbrio da planta quando em condições de estresse (SILVA, et al., 2021). Hormônios como auxinas, etileno, giberelina e cinetinas são produzidos por estes microrganismos e desempenham um papel fundamental no fortalecimento das raízes auxiliando no crescimento e na resistência da planta ao ambiente na qual é exposta (GUIMARÃES et al., 2017; MAJEED; MUHAMMAD; AHMAD, 2018).

O ácido indol-3-acético (ácido indolacético, IAA) é a auxina mais comum que afeta as células vegetais, estimula germinação, aumenta taxa de desenvolvimento do xilema e da raiz, controla os processos de desenvolvimento vegetativo, além de afetar a fotossíntese, a biossíntese de vários metabólitos e a resistência a condições estressantes (GLICK, 2012; FIGUEREDO, 2018; PORTO et al., 2022).

Assim como o IAA, o hormônio vegetal etileno tem uma ampla gama de atividades biológicas que incluem a influência no crescimento, desenvolvimento, iniciação de raízes, amadurecimento dos frutos, ativação da síntese de outros hormônios e respostas a estresses bióticos e abióticos (SAHARAN; NEHRA, 2011; GUIMARÃES et al., 2017). Muito embora, as respostas sejam positivas, o acúmulo de etileno em condições de muito estresse pode ocasionar em grandes picos hormonais que levarão a inibição do crescimento, senescência e clorose da planta (SAHARAN; NEHRA, 2011).

No mecanismo indireto, têm-se as bactérias como agentes de biocontrole capazes de promover de forma indireta o crescimento das plantas. As BPCP possuem a habilidade de sintetizar diferentes antibióticos e produzir enzimas como quitanase, celulases, proteases e lipases, capazes de lisar a parede celular de diversos fungos

fitopatogênicos (GLICK, 2012; FIGUEREDO, 2018). Algumas dessas cepas já são comercializadas e podem apresentar controle de *Botrytis cinerea*, *Sclerotium rolfisii*, *Fusarium oxysporum*, *Phytophthora spp.* e *Rhizoctonia solani* (AGROLINK, 2023) Outro método de biocontrole empregado pelas bactérias promotoras de crescimento é a produção de sideróforos, neste, as BPCP impedem os patógenos de adquirir ferro e limitam a sua capacidade de proliferação na rizosfera das plantas hospedeiras (GUIMARÃES et al., 2017; MAJEED; MUHAMMAD; AHMAD, 2018).

A competição gerada entre microrganismos patogênicos e não patogênicos limitam a incidência e a gravidade de doenças e auxiliam de forma indireta no crescimento das plantas. Isso ocorre devido as BPCP colonizarem a superfície da planta de forma abundante consumindo a maior parte dos nutrientes disponíveis e dificultando o crescimento de patógenos (SAHARAN; NEHRA, 2011; GLICK, 2012; MAJEED; MUHAMMAD; AHMAD, 2018). As BPCP também podem ser utilizadas para desencadear a Resistência Sistêmica Induzida (ISR- do inglês "Induced Systemic Resistance"), um mecanismo de defesa sofisticado que permite o reconhecimento de patógenos e induz respostas de defesa mais rápidas e eficazes através da alteração e sinalização de fitormônios como jasmonato e etileno (SAHARAN; NEHRA, 2011; FIGUEREDO, 2018).

Fatores que contribuem para um menor desenvolvimento e produtividade das plantas, tornando a sua existência um contínuo de altos e baixos com períodos de crescimento e períodos com vários níveis de inibição. Com o uso de BPCP, há o emprego de várias estratégias e mecanismos para superar a inibição e promover o crescimento (RAMAKRISHNA; YADAV; LI, 2019; GUIMARÃES et al., 2017).

É comum que a maioria dos estresses ambientais aumentem os níveis de etileno, estresses contínuos ocasionam um acúmulo muito superior ao necessário na planta, levando a consequências danosas que podem ser evitadas com o uso de bactérias promotoras de crescimento contendo ACC desaminase (OROZCO-MOSQUEDA et al., 2019; OROZCO-MOSQUEDA et al., 2022). A ACC desaminase (EC 3.5.99.7) é uma enzima dependente de piridoxal-5'-fosfato (PLP) que catalisa a abertura do anel do 1-aminociclopropano-1-carboxilato (ACC), convertendo-o irreversivelmente em α -cetobutirato e amônia, removendo assim o precursor imediato do etileno em plantas (HONMA, 1985; SHAHID et al., 2023). Mesmo BPCP que não contenham ACC desaminase são capazes de proteger as plantas dos estresses

abióticos, através do fornecimento de IAA, que estimula diretamente o crescimento vegetal mesmo na presença de estresses limitantes (GLICK, 2012; PORTO et al., 2022).

Muito embora ambos possam proteger as culturas em sua total independência, é relatado que as bactérias mais eficientes na proteção das plantas contra os diferentes estresses produzam IAA e ACC dinaminase de forma sinérgica, onde ambas promovem o crescimento das plantas (GLICK, 2012; OROZCO-MOSQUEDA; GLICK; SANTOYO, 2020). Para tal, a ACC desaminase diminui a inibição do crescimento das plantas pelo etileno e permite que a IAA promova o crescimento das plantas, tanto na presença quanto na ausência de estresse (OROZCO-MOSQUEDA et al., 2022).

Uma maneira de conferir tolerância à seca as plantas é utilizar de BPCP projetadas para produzir trealose em excesso. A Trealose é um dissacarídeo não redutor amplamente distribuído na natureza (ZAGO, 2017; OROZCO-MOSQUEDA et al., 2019). Altos níveis da trealose podem conferir proteção contra diversos estresses abióticos, como a seca, extremos de temperatura e salinidade (RAMAKRISHNA; YADAV; LI, 2019; PORTO et al., 2022). Como uma molécula extremamente estável resistente a ácidos e temperaturas elevadas, pode formar um gel à medida que as células desidratam, substituindo a água e conseqüentemente diminuindo os danos da seca e sal (GLICK, 2012; ZAGO, 2017). Estudos recentes, apontam ação sinérgica de ACC desaminase e trealose em bactérias promotoras de crescimento, como *Azospirillum*, *Arthrobacter*, *Azotobacter*, *Bacillus* e *Pseudomonas*, na proteção de culturas contra o estresse salino (OROZCO-MOSQUEDA et al., 2019; OROZCO-MOSQUEDA; GLICK; SANTOYO, 2020; OROZCO-MOSQUEDA et al., 2022)

2.3 Influência de bactérias promotoras de crescimento de plantas na Palma Forrageira

O déficit hídrico é uma situação comum a produções de diversas culturas no Brasil e no mundo, tornando-se um dos principais agentes estressores responsáveis por grandes impactos negativos na produção agrícola (JÚNIOR et al., 2018; MAMÉDIO et al., 2020), causando desequilíbrio hormonal, distúrbios fisiológicos, senescência e aumento da suscetibilidade a doenças (PORTO et al., 2022).

As plantas sofrem de estresse hídrico quando há uma diminuição do suprimento de água ou evaporação excessiva, causada pela intensa taxa de transpiração (CARMO, 2019). Com a menor captação de água há uma redução do turgor celular que quando aliado a altas temperatura ameaçam a produção das culturas (JÚNIOR et al., 2018; MAMÉDIO et al., 2020).

O estresse causado pela seca é considerado como um dos mais graves estresses abióticos, com efeitos marcantes nas plantas, em níveis morfológicos, fisiológicos, bioquímicos e moleculares afetando todos os estágios de seu desenvolvimento que vão desde a germinação até o desenvolvimento e produtividade (ROCHA, 2022; PORTO et al., 2022). Algumas das consequências geradas nas plantas envolve a redução da taxa de divisão celular e expansão, tamanho da folha, alongamento do caule, proliferação de raízes e oscilações estomáticas. Reduções hídricas severas ocasionam paralisação no crescimento e morte da parte aérea do vegetal (JÚNIOR et al., 2018; CARMO, 2019; MAMÉDIO et al., 2020).

De modo geral, a degradação da planta ocorre devido a diminuição na absorção de nutrientes pela rizosfera, uma vez que a planta precisa de água para absorver solutos ricos em nutrientes e minerais. Limitações na taxa fotossintética, devido a menor disponibilidade hídrica, resultando em menor assimilação de CO₂ (JÚNIOR et al., 2018; PORTO et al., 2022), ocasionando redução de área foliar, fechamento estomático, atividades danosas de enzimas de carboxilação, síntese de ATP e destruição de aparelhos fotossintéticos (LABANCA, 2019; SILVA et al., 2021). Perturbação no balanço entre as espécies reativas de Oxigênio (EROs) e a defesa antioxidante da planta, causando um acúmulo de EROs e como consequência induzindo o estresse oxidativo (LABANCA, 2019; PORTO et al., 2022).

As plantas ao longo da evolução, desenvolveram diversos mecanismos de adaptação para tolerar eventos estressantes como a seca, afim de amenizar ou fugir dos distúrbios causados pela falta de água (SILVA et al., 2021). Algumas das estratégias utilizadas para sobreviver ao déficit hídrico pode ser dividida em escape, retardo e tolerância (JÚNIOR et al., 2018). No escape, têm-se um rápido desenvolvimento fisiológico, onde as plantas completam seu ciclo antes que os problemas advindos da seca as levem à morte (MAMÉDIO et al., 2020; PORTO et al., 2022). O retardo por sua vez, está relacionado com a capacidade da planta de obter um sistema radicular eficiente que permita a absorção de água suficiente para manter

a turgidez e o volume celular da planta, isto também depende da sua aptidão em manter a água retida, não perdendo-a para atmosfera (JÚNIOR et al., 2018; CARMO, 2019). A tolerância, está relacionada a capacidade da planta de manter suas funções fisiológicas mesmo sob o estresse hídrico.

Muito embora as cactáceas apresentem metabolismo CAM adaptado as condições de seca, elas também são afetadas pelo déficit hídrico, uma vez que seus estômatos passam a não abrir durante a noite e restringem a respiração e o crescimento da planta (CRUZ, 2021; SILVA et al., 2021). Quando expostas a um déficit prolongando, os tecidos como parênquima aquífero ou hidrênquima, responsáveis pelo armazenamento de água e o atraso da desidratação, se esgotam e não são capazes de manter a planta (HERRERA, 2009; CARMO, 2019). Os efeitos da seca levam a inibição da fotossíntese devido ao desbalanço entre a troca de elétrons gerados e utilizados, provocando uma maior geração de espécies reativas de oxigênio (EROS) (LABANCA, 2019; PORTO et al., 2022).

Por se tratar de uma CAM, o cultivo da palma forrageira é satisfatório quanto a produção de biomassa em regiões semiáridas, por apresentar elevada eficiência quanto ao uso da água, mas em condição de estresse hídrico a planta passa a aumentar a operação do sistema antioxidante, devido a incrementos metabólicos e atividade enzimáticas (HERRERA, 2009; SILVA et al., 2021). Como consequência, há reduções expressivas no crescimento da palma, com até 42% da clorofila total, a atividade de fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPC) diminuiu significativamente com 19 % do clorênquima e 60% do parênquima restringidos. O transporte de elétrons torna-se desbalanceado, com 29% do clorênquima reduzido e 150% do parênquima aumentado (BECERRIL & VALDIVIA, 2006).

A associação de bactérias promotoras de crescimento com a palma forrageira pode gerar diversos benefícios, como uma maior contribuição para a sustentabilidade do sistema produtivo, maior suprimento de nitrogênio e mitigação dos efeitos causados pelo déficit hídrico (MAMÉDIO et al., 2020). Gêneros como *Azospirillum*, *Bacillus*, *Methylobacterium* e *Bradyrhizobium* foram relatados associados a cultura da palma, no bioma caatinga com características de bactérias promotoras de crescimento (SILVA et al., 2015; CELESTINO, 2019). A aplicação de BPCP induzida com ácido salicílico apresenta capacidade de inibição de patógeno influenciando positivamente no crescimento da planta (LYRA et al., 2016).

O nitrogênio (N) é o principal macronutriente absorvido pelas plantas cultivadas. Atuando diretamente no processo de fotossíntese, é responsável pelo crescimento da planta, pela produção de novas células e tecidos (FREITAS et al., 2019; CRUZ, 2021). A palma adubada com doses crescentes de nitrogênio apresenta maior produção de cladódios e matéria seca (NETO et al., 2020; MATOS, 2020; LIMA et al., 2020). Assim como, há uma melhora quanto aos aspectos nutricionais, com aumento do teor de proteínas e redução no teor de carboidratos fibrosos (CRUZ, 2021).

Bactérias de vida livre do gênero *Azospirillum*, como *Azospirillum brasilense* apresenta influência positiva sobre a produção e crescimento de plantas com importância agrônômica (CRUZ, 2021). Uma das características *A. brasiliense* é a fixação de nitrogênio e a secreção de fitormônios que interferem no crescimento e desenvolvimento da planta, agindo no sistema radicular, estimulando na absorção de nutrientes (FREITAS et al., 2019; MAMÉDIO et al., 2020).

2.4 Importância das bactérias promotoras de crescimento de plantas nos atributos químicos e físicos do solo

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) define o solo como um corpo natural dinâmico constituído por fases sólida, líquida e gasosa, formado pela interação entre materiais minerais, matéria orgânica e organismos vivos. Esses componentes se organizam em horizontes diferenciados, originados a partir dos processos pedogenéticos. O solo estabelece, assim, uma interface fundamental entre a litosfera, a biosfera e a atmosfera, desempenhando papel central na manutenção dos ecossistemas (EMBRAPA, 2018). É um recurso essencial na produção de alimentos, entretanto, a degradação do solo tornou-se parte do processo evolutivo do homem (CUNHA, 2019)

As práticas agrícolas modernas acentuaram os rendimentos das culturas nos últimos anos, parte desse avanço deve-se ao uso de fertilizantes, junto aos controles químicos de patógenos, irrigação e ao avanço da ciência com o uso de híbridos (RAMAKRISHNA; YADAV; LI, 2019). Com o fortalecimento da tecnologia e inovação, surgiram diversas problemáticas ambientais, contaminação dos lençóis freáticos, degradação do solo e a redução de biodiversidade (PANDEY et al., 2019), associados

ao uso indiscriminado de defensivos ou uso irregular de fertilizantes químicos. Mas é importante salientar que, não é a agricultura em si a causa das externalidades ambientais, mas sim o uso intensivo e tecnicamente inadequado de práticas e insumos.

No sistema intensivo, é comum que os solos apresentem deficiência em alguns nutrientes, tornando necessário a suplementação com fertilizantes químicos para obter um crescimento desejável das plantas (GLICK, 2012; FIGUEREDO, 2018). No entanto, além de elevado custo, a produção dos fertilizantes utiliza de recursos não renováveis como o petróleo e o gás natural e apresenta baixa eficiência de utilização, devido a perda por volatilização, desnitrificação, lixiviação e conversões indisponíveis (MAJEED; MUHAMMAD; AHMAD, 2018; PANDEY et al., 2019). Atualmente, a utilização de fertilizantes é apontado como um dos maiores emissores de CO₂ na agricultura, principalmente por seu processo de produção e perdas após aplicação.

Os microrganismos presentes no solo, desempenha um importante papel da regulação da fertilidade do solo, na ciclagem de nutrientes e na manutenção da diversidade local (RAMAKRISHNA; YADAV; LI, 2019; REN et al., 2019; PORTO et al., 2022). As BPCP aumentam o crescimento das plantas, formam matrizes complexas no solo que auxiliam na absorção de macronutrientes (nitrogênio, potássio, cálcio, magnésio, fósforo e enxofre) e micronutriente (cloro, ferro, boro, manganês, zinco, cobre e níquel), assim como nas respostas de defesa das plantas, aumentando a tolerância ao estresse salino, hídrico e na contaminação por metais pesados (MAJEED; MUHAMMAD; AHMAD, 2018; PANDEY et al., 2019; REN et al., 2019; EMMANUEL; BABALOLA, 2020). Da mesma maneira, as rizobactérias desempenham um papel fundamental na decomposição de matéria orgânica, desintoxicação de substâncias nocivas, no alívio de estressores do solo e na supressão de microrganismos patogênicos (COMPANT; CLÉMENT; SESSITSCH, 2010; PORTO et al., 2022). Como consequência, há uma restauração de terras degradadas, melhoria na qualidade do solo e redução de poluentes ambientais presentes no solo, tornando-se um aliado ao combate às mudanças climáticas (PANDEY et al., 2019; LABANCA, 2019).

Bactérias que realizam a Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) atmosférico como *Rhizobium* e *Bradyrhizobium* são habitantes naturais do solo que podem estabelecer simbiose formando nódulos em raízes de leguminosas, desta forma, é

possível converter o nitrogênio em amônia e usá-lo como fonte assimilável, podendo suprimir até 100% da necessidade de N da planta (GLICK, 2012; RAMAKRISHNA; YADAV; LI, 2019). Isso ocorre devido aos microrganismos apresentarem enzimas nitrogenase, um complexo enzimático capaz de quebrar a ligação tripla do N² atmosférico a NH₃⁺ assimilável pelas plantas, no entanto, esta é uma característica presente apenas nas leguminosas (CRUZ, 2021; SILVA *et al.*, 2022).

Bactérias de vida livre como *Azospirillum*, *Azoarcus*, *Azobacter*, *Bacillus*, *Herbaspirillum* podem *Rhodospirillum*, *RhodoPseudomonas* e *Xanthobacter* fixam nitrogênio em culturas de trigo, sorgo, milho, arroz e cana de açúcar (SAHARAN; NEHRA, 2011; SILVA *et al.*, 2019; LABANCA, 2019; PEREIRA, 2019; MATTOS *et al.*, 2020; VERGÜTZ; LUDWIG, 2021; GAMBIM, 2021). A limitação para as bactérias de vida livre é a disponibilidade de carbono e fonte de energia para o processo de FBN, mas essa limitação pode ser compensada movendo-se para mais perto ou dentro da planta, uma vez que ao aproximar-se ou internalizar-se no hospedeiro substitui a limitação energética por um ambiente rico em carbono, microaeróbio e com sumidouro de N, tornando a FBN bioenergeticamente viável e ecologicamente estável para bactérias não simbióticas estritas (SAHARAN; NEHRA, 2011; GLICK, 2012).

Depois do nitrogênio, o fósforo (P) é o elemento de maior importância para o crescimento das plantas. Embora haja grandes quantidades de fósforo no solo (400 e 1200 mg kg⁻¹ de solo), a maior parte desse fósforo é insolúvel e não está disponível para o crescimento das plantas (SAHARAN; NEHRA, 2011; GLICK, 2012). Diversos grupos de microrganismos presentes no solo tem a capacidade, por meio de diferentes mecanismos, de solubilizar fósforo, mas essa atividade não é o suficiente para suprir a demanda existente (GUIMARÃES *et al.*, 2017; PANDEY *et al.*, 2019; RAMAKRISHNA; YADAV; LI, 2019). A solubilização do P pode resultar da produção de CO₂ e de ácidos orgânicos oriundos da mineralização de carbono orgânico, ou da produção de enzimas e de compostos quelantes, transformando o CO₂ dissolvido em água forma H₂CO₃ (ácido carbônico), que se dissocia liberando prótons (H⁺), esses prótons são capazes de solubilizar fosfatos inorgânicos associados a cálcio, ferro, alumínio e magnésio, aumentando a disponibilidade de fósforo para as plantas (GLICK, 2012; GUIMARÃES *et al.*, 2017).

Embora o ferro (Fe) seja um dos elementos mais abundantes na terra, no solo ele não é facilmente assimilado por plantas, isso porque o íon Fe⁺³,

predominantemente presente na natureza é pouco solúvel (SAHARAN; NEHRA, 2011; GLICK, 2012). De modo que, o ferro restante de fácil assimilação pelos organismos seja extremamente baixo, tornando inevitável uma competição feroz entre plantas, bactérias e fungos (PANDEY et al., 2019; GUIMARÃES et al., 2017). Para sobreviver com suprimentos tão baixos, as bactérias sintetizam sideróforos, pequenos compostos quelantes de ferro de alta afinidade com baixo peso molecular, com receptores de membranas, capazes de ligar ao complexo Fe-sideroforo, facilitando a absorção (GLICK, 2012; MAJEED; MUHAMMAD; AHMAD, 2018; PANDEY et al., 2019). Os sideróforos atuam nas relações entre microrganismos com forte influência sob patógenos e na nutrição de plantas (SAHARAN; NEHRA, 2011).

O fornecimento de ferro às plantas torna-se ainda mais necessário quando são submetidas a estresse ambiental, como a poluição por metais pesados em solos contaminados (GLICK, 2012; PANDEY et al., 2019). Nesse caso, os sideróforos ajudam a amenizar o estresse imposto pelos altos níveis de metais pesados presentes no solo (GUIMARÃES et al., 2017; PORTO et al., 2022). A aplicação de BPCP gera uma eficácia aumentada na reutilização de nutrientes, desintoxicação de resíduos nocivos e reconstrução do solo, isso porque as rizobactérias são responsáveis por mitigar a toxicidade de metais pesados a partir da formação de complexos metálicos dos quais utilizam de sideróforos (LABANCA, 2019; PANDEY et al., 2019).

As estirpes *Azospirillum brasilense* Ab-V5 e *A. brasilense* Ab-V6 são amplamente empregadas como inoculantes comerciais no Brasil, com capacidade comprovada de promover o crescimento vegetal por meio da fixação biológica de nitrogênio e estímulo à aquisição de nutrientes, o que se traduz em maior rendimento e eficiência fisiológica em culturas diversas (MATOS et al., 2022; OLIVEIRA et al., 2023). *Rhizobium tropici* é um rizóbio simbiótico altamente adaptado a solos ácidos e de baixa fertilidade, formando nódulos em leguminosas como o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) e contribuindo significativamente para a fixação de nitrogênio em sistema leguminoso (MOURA et al., 2022; RODRIGUES et al., 2024). Por sua vez, *Bacillus subtilis*, bactéria gram-positiva de vida livre, desempenha múltiplas funções benéficas à planta, incluindo indução de resistência sistêmica, solubilização de fósforo, produção de compostos antifúngicos e promoção da tolerância a estresses biótico e abiótico, fortalecendo o sistema radicular e o rendimento das culturas (HASHIM et al., 2019).

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, E. Y.; EZZAT, M. I.; EL HEFNAWY, H. M.; ABDEL-SATTAR, E. An overview and update on the chemical composition and potential health benefits of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. **Journal of Food Biochemistry**, e14310. 2022.

ALBUQUERQUE, J.G.; AQUINO, J. S.; ALBUQUERQUE, J. G.; FARIAS, t. G. S.; ESCALONA-BUENDÍA, H. B.; BOSQUEZ-MOLINA, E.; AZOUBEL, P. M. Consumer perception and use of nopal (*Opuntia ficus-indica*): a study cross-cultural between Mexico and Brazil. **International Food Research**, v. 124, p. 101-108, 2019.

ARAÚJO, F. F.; FARIAS, D. P.; NERI-NUMA, I. A.; PASTORE, G. M. Underutilized plants from the Cactaceae family: nutritional aspects and technological applications. **Elsevier**, v. 362, p. 130196, 2021.

ARAÚJO, T. P.M.; LIMA JÚNIOR, D. M.; SILVA, E. C. L.; NEVES, M. L. M. W.; SANTOS, K. C.; FERREIRA, M. A.; MONNERAT, J. P. I.; ALVES, S. P. A.; BESSA, R. J. B.; CARVALHO, F. F. R. Effect of cactus species in the diet of dairy goats on feed efficiency, milk production and composition of milk and cheese. **Animal Feed Science and Technology**, v. 304, p. 115755, 2023.

ARAÚJO, F. F.; FARIAS, D. P.; NERI-NUMA, I. A.; PASTORE, G. M. Underutilized plants from the Cactaceae family: nutritional aspects and technological applications. **Elsevier**, v. 362, p. 130196, 2021.

BARBOSA, J. Z.; ROBERTO, L. A.; HUNGRIA, M.; CORRÊA, R. S.; MAGRI, E.; CORREIA, T. D. Meta-analysis of maize responses to *Azospirillum brasilense* inoculation in Brazil: Benefits and lessons to improve inoculation efficiency. **Applied Soil Ecology**, v. 170, p. 104276, 2022.

BARROS, Fellype Abreu. **Cultivo de palma forrageira em sistemas consorciados na região semiárida brasileira – uma revisão**. 2022. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Medicina Veterinária) - Universidade Federal de Sergipe, Nossa Senhora da Glória, 2022.

BECERRIL, G. A.; VALDIVIA, C. B. P. Alteraciones fisiológicas provocadas por sequía en nopal (*Opuntia ficus-indica*). **Revista Fitotecnia Mexicana**, v. 29, n. 3, p. 231-237, 2006.

BELHADJ SLIMEN, I.; NAJAR, T.; ABDERRABBA, M. Bioactive compounds of prickly pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.]. **Bioactive Compounds in Underutilized Vegetables and Legumes**, p. 1-40, 2020.

CARMO, M. D. S. D. **Análise proteômica diferencial de palma forrageira sob infestação por cochonilha-de-escama e déficit hídrico**. 2019, 128p. Tese (Doutorado em Biotecnologia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

CELESTINO, E. L. F. G. **Bactérias promotoras de crescimento isoladas da caatinga alagoana**. 2019. 91 f. Tese (Doutorado em Biotecnologia) - Instituto de Química e Biotecnologia, Programa de Pós-Graduação da Rede Nordeste de Biotecnologia (RENORBIO), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

COMPANT, S.; CLÉMENT, C.; SESSITSCH, A. Plant growth-promoting bacteria in the rhizo-and endosphere of plants: their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 5, p. 669-678, 2010.

CRUZ, E. R. T. **Palma forrageira inoculada com *Azospirillum brasilense* e submetida à adubação nitrogenada**. 2021, 52 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia). Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, 2021.

CUNHA, E. G. Gestão da sustentabilidade através do plano de manejo agroecológico: estudo de caso de uma área agrícola degradada. 2019. In: II SIMPÓSIO EM GESTÃO DO AGRONEGÓCIO. **Anais...** Sustentabilidade e Segurança Alimentar: Novas Demandas ao Agronegócio. Jaboticabal-SP, 2017.

DA-SILVA, J. R. CORREIA-LIMA, L.; FERNANDES, G.; RIBEIRO-FILHO, N.; MADRUGA, M. S.; LIMA, M. S.; MUNIZ, M. B. Mandacaru fruit pulp (*Cereus jamacaru* D.C.) as an adjunct and its influence on beer properties. **Food Chemistry**, v. 406, p. 135066, 2023.

DUBEUX JR, J. C. B., DOS SANTOS, M. V. F., DA CUNHA, M. V., DOS SANTOS, D. C., DE ALMEIDA SOUZA, R. T., DE MELLO, A. C. L., & DE SOUZA, T. C. Cactus (*Opuntia and Nopalea*) nutritive value: A review. **Animal Feed Science and Technology**, v. 275, p. 114890, 2021.

EMMANUEL, O. C.; BABALOLA, O. O. Productivity and quality of horticultural crops through co-inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting bacteria. **Microbiological Research**, v. 239, p. 126569, 2020.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

FIGUEREDO, Everthon Fernandes. **Nocaute do gene ipdC no *Bacillus* sp. (RZ2MS9) com a técnica de CRISPRCas9 e influência sobre a biossíntese do AIA dependente do L-triptofano**. 2018. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

FUKAMI, J.; OLLERO, F. J.; MEGIAS, M.; HUNGRIA, M. Phytohormones and induction of plant-stress tolerance and defense genes by seed and foliar inoculation with *Azospirillum brasilense* cells and metabolites promote maize growth. **AMB Expr**, v. 7, p. 153, 2017.

FREITAS, P. V. D. X.; TOMAZELLO, D. A.; ISMAR, M. G.; BRAW, T. T.; ROMUALDO,

A. F.; MACIEL, A. A. L. P.; FIRMINO, A. E.; FRANÇA, A. D. S. Produção de gramíneas forrageiras inoculadas com *Azospirillum brasilense* associada a adubação nitrogenada. **Revista Científica Rural**, v. 21, p. 31-46, 2019.

FREITAS, W. F. R. **Palma forrageira *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill e *Nopalea cochenilifera* (L.) Salm-Dyck**. 2021, 3f. Monografia (Tecnologia em Agroecologia), Universidade Federal de Campina Grande, Sumé- PB, 2021.

GAMBIN, A. M. **Utilização do *Azospirillum brasilense* na produção do Capim Sudão (*Sorghum Sudanense*)**. 2021, 44 f. Monografia (Bacharelado em Agronomia), Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Santana do Livramento, RS, 2021.

GLICK, B. R. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. **Scientifica**, v. 2012, p. 963401, 2012.

GUIMARÃES, V. F.; BATTISTUS, A. G.; SOUZA, A. D.; BULEGON, L. G.; OFFEMANN, L. C.; INAGAKI, A. M. **Bactérias Promotoras de Crescimento Vegetal: da FBN à regulação hormonal, possibilitando novas aplicações**. CIÊNCIAS AGRÁRIAS: ética do cuidado, legislação e tecnologia na agropecuária p. 193-212. 2017.

HASHEM, A.; TABASSUM, B.; ABD-ALLAH, E. F. *Bacillus subtilis*: A plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 26, n. 6, p. 1291-1297, 2029.

HERRERA, A. Crassulacean acid metabolism and fitness under water deficit stress: if not for carbon gain, what is facultative CAM good for?. **Annals of botany**, v. 103, n. 4, p. 645-653. 2009.

HONMA, M. Chemically reactive sulfhydryl groups of 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase. **Agricultural and Biological Chemistry**, v. 49, p. 567–571, 1985.

JÚNIOR, G. D. N. A.; GOMES, F. T.; DA SILVA, M. J.; DA ROSA JARDIM, A. M. F.; SIMÕES, V. J. L. P.; IZIDRO, J. L. P. S.; LEITE, M. L. L. V.; TEIXEIRA, V. I.; DA SILVA, T. G. F. Estresse hídrico em plantas forrageiras: Uma revisão. **Pubvet**, v. 13, p. 148. 2018.

JUNIOR, O. S. X.; JARDIM, A. M. D. R. F.; DE SOUZA, L. S. B.; DE SOUZA, C. A. A.; DA CRUZ NETO, J. F.; JÚNIOR, G. D. N. A.; LEITE, R. M; C.; SILVA, T. G. F. Utilização de biofertilizantes alternativos no cultivo de palma forrageira: Uma revisão. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 10, n. 6, p. e46110616024-e46110616024, 2021.

LABANCA, E. R. G. **Impacto de bactérias promotoras de crescimento de plantas no microbioma radicular e na fisiologia da cana-de-açúcar em solo com excesso de alumínio**. 2019, 169 f. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical). Instituto Agrônomo, Campinas, SP, 2019.

LIMA, A. S.; DA SILVA, P. F.; DE MATOS, R. M.; BONOU, S. I.; NETO, J. D. Determinação da área de cladódios e fator de correção da palma forrageira sob fertirrigação nitrogenada. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 14, p. 3803, 2020.

LOPES, L. A.; CARDOSO, D. B.; CAMARGO, K. S.; SILVA, T. G. P.; SOUZA, J. S. R.; SILVA, J. R. C.; MORAIS, J. S.; ARAÚJO, T. P. M. Palma forrageira na alimentação de ruminantes. **PUBVET**, v. 13, p. 170, 2019.

LOPES, M. J. S.; SANTIAGO, B. S.; SILVA, I. N. B.; GURGEL, E. S. C. Microbial biotechnology: inoculation, mechanisms of action and benefits to plants. **Research, Society and Development**, [S. l.], v.10, n.12, p.e356101220585, 2021.

LYRA, M. C. C. P.; PÉREZ-MONTAÑO, F.; JIMÉNEZ-GUERRERO, I.; MADINABEITIA, N.; DIAZ-OLIVARES, I. M.; GUTIÉRREZ-ALCÁNTARA, R.; OLLERO, F. J. SESSION IV SIV-CP-17 Efeito de bactérias PRPG com indução de ácido salicílico em plântulas de duas cultivares de palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*). In **II Iberoamerican Conference on Beneficial Plant-microorganism-environment Interactions (IBEMPA)** (p. 309), 2016.

MACÊDO, A. J. S.; NETO, J. M. C.; DE OLIVEIRA, L. B.; EDVAN, R. L.; SANTOS, E. M. A cultura da palma, origem, introdução, expansão, utilidades e perspectivas futuras: Revisão de Literatura. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 62967-62987, 2022.

MAJEED, A.; MUHAMMAD, Z.; AHMAD, H. Plant growth promoting bacteria: role in soil improvement, abiotic and biotic stress management of crops. **Plant cell reports**, v. 12, p. 1599-1609, 2018.

MAMÉDIO, D.; CECATO, U.; SANCHES, R.; DA SILVA, S. M. D. S.; DA SILVA, D. R.; RODRIGUES, V. O. Bactérias promotoras do crescimento de plantas contribuem para a maior persistência das pastagens tropicais em déficit hídrico?-Uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e523985756, 2020.

MARQUES, O. F. C.; DE PAULA GOMES, L. S.; MOURTHÉ, M. H. F.; DOS SANTOS BRAZ, T. G.; NETO, O. D. S. P. Palma forrageira: cultivo e utilização na alimentação de bovinos. **Caderno de Ciências Agrárias**, v. 9, n. 1, p. 75-93, 2017.

MATTOS, M. L. T.; DA SILVA MARTINS, J. F.; DE FILLIPI, M. C. C. Efeito de agentes de biocontrole sobre bactérias degradadoras de resíduos de agrotóxicos e fixadoras de nitrogênio. **Embrapa Clima Temperado-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**. 2020.

MATOS, M. L. T.; VALGAS, R. A.; MARTINS, J. F. S. Evaluation of the Agronomic Efficiency of *Azospirillum brasilense* Strains Ab-V5 and Ab-V6 in Flood-Irrigated Rice. **Agronomy**, v. 12, n. 12, p. 3047, 2022.

MATOS, R. M. D. **Função de produção e pegada hídrica da palma forrageira sob lâminas de irrigação e adubação nitrogenada**. 2020.

MOURA, F. T.; RIBEIRO, R. A.; HELENE, L. C. F.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. So many rhizobial partners, so little nitrogen fixed: The intriguing symbiotic promiscuity of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Symbiosis**, v. 86, n. 2, p. 169-185, 2022.

NETO, J. D.; MATOS, R. M. D.; SILVA, P. F. D.; LIMA, A. S. D.; DE AZEVEDO, C. A.; SABOYA, L. M. Crescimento e produtividade de palma forrageira sob frequências de irrigação e adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, p. 664-671, 2020.

NÓBREGA, J. S.; NASCIMENTO, R. G. S.; SILVA, R. T.; FIGUEREDO, F. R. A.; BEZERRA, A. C.; LOPES, M. F. Q.; ALVES, E. U.; BRUNO, R. L. A. Ácido salicílico atenuou o efeito do estresse hídrico na germinação e crescimento inicial de plântulas de *Cereus jamacaru* DC. **Scientia Plena**, v.17, p. 040204, 2021.

NYFFELER, R.; EGGLI, U. A farewell to dated ideas and concepts - Molecular phylogenetics and a revised suprageneric classification of the family Cactaceae. **Schumannia**, v. 6, p. 109-149, 2010.

OLANREWAJU, O.S.; GLICK, B.R.; BABALOLA, O.O. Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v.33, n.11, p.197, 2017.

OLIVEIRA, C. E. S.; JALAL, A.; VITÓRIA, L. S.; GIOLO, V. M.; OLIVEIRA, T. J. S.; AGUILAR, J. V.; CAMARGOS, L. S.; BRAMBILLA, M. R.; FERNANDES, J. V.; VARGAS, P. F.; ZOZ, t.; FILHO, m. C. M. T. Inoculation with *Azospirillum brasilense* Strains AbV5 and AbV6 Increases Nutrition, Chlorophyll, and Leaf Yield of Hydroponic Lettuce. **Plant**, v. 12, n. 17, p. 3107, 2023.

OROZCO-MESQUITA, M. D. C.; GLICK, B. R.; SANTOYO, G. ACC deaminase in plant growth-promoting bacteria (PGPB): an efficient mechanism to counter salt stress in crops. **Microbiological research**, v. 235, p. 126439, 2020.

OROZCO-MOSQUEDA, M. D. C.; DUAN, J.; DIBERNARDO, M.; ZETTER, E.; CAMPOS-GARCÍA, J.; GLICK, B. R.; SANTOYO, G. The production of ACC deaminase and trehalose by the plant growth promoting bacterium *Pseudomonas* sp. UW4 synergistically protect tomato plants against salt stress. **Frontiers in microbiology**, v. 10, p. 1392, 2019.

OROZCO-MOSQUEDA, M. D. C.; KUMAR, A.; GLICK, B. R.; SANTOYO, G. The role of bacterial ACC deaminase and trehalose in increasing salt and drought tolerance in plants. **Mitigation of Plant Abiotic Stress by Microorganisms**, p. 41-52, 2022.

PANDEY, A.; TRIPATHI, A.; SRIVASTAVA, P.; CHOUDHARY, K. K.; DIKSHIT, A. Plant growth-promoting microorganisms in sustainable agriculture. In **Role of plant growth promoting microorganisms in sustainable agriculture and nanotechnology** (pp. 1-19). Woodhead Publishing. 2019.

PEREIRA, G. M. A. **Interação de bacterias fixadoras de nitrogênio como**

inoculantes na cultura do milho, 2019.

PESSOA, R. M. S.; PESSOA, A. M. S.; COSTA, D. C. C. C.; AZEVÊDO, P. C. S.; GOIS, G. C.; CAMPOS, F. S.; VICENTE, S. L. A.; FERREIRA, J. M. S.; LIMA, D. O. Palma forrageira: Adubação orgânica e mineral. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 13, p. e12111334267-e12111334267, 2022.

QUEIROGA, V. P.; LOPES, B. E.; GIRÃO, E. G.; NETO, A. F.; ALBUQUERQUE, E. M. B. Palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill): Tecnologias de plantio e utilização. led. – Campina Grande: **AREPB**, p. 224, 2020.

RAMAKRISHNA, W.; YADAV, R.; LI, K. Plant growth promoting bacteria in agriculture: two sides of a coin. **Applied Soil Ecology**, v. 138, p. 10-18., 2019

REN, X. M.; GUO, S. J.; TIAN, W.; CHEN, Y.; HAN, H.; CHEN, E.; LI, B. L.; LI, Y. Y.; CHEN, Z. J. Effects of plant growth-promoting bacteria (PGPB) inoculation on the growth, antioxidant activity, Cu uptake, and bacterial community structure of rape (*Brassica napus* L.) grown in Cu-contaminated agricultural soil. **Frontiers in microbiology**, v. 10, p. 1455, 2019.

RODRIGUEZ, J. C.; RIOS, W. F.; VALDEZ, R. A.; ROJAS, J. C. Efficient Rhizobium Spp. strains in nitrogen fixation enhance the yield of *Phaseolus Vulgaris* Var. "panamito" in acidic soils. **Chemical Engineering Transactions**, v. 111, p. 691-696, 2024.

SAHARAN, B. S.; NEHRA, V. Plant growth promoting rhizobacteria: a critical review. **Life Sci Med Res**, v. 21, n. 1, p. 30, 2011.

SAMPAIO, E. V. S. B.; MENEZES, R. S. C. Perspectivas de uso do solo no semi-árido nordestino. In: ARAUJO, Q. R. **500 anos de uso do solo no Brasil**. Ilhéus: Ba, p.339-363, 2002.

SANTOS, M. A.; SANTOS, B. R. C. Silagem da palma forrageira consorciada com resíduos da mandioca e bagaço da cana-de-açúcar: Revisão. **Pubvet**, v. 12, p. 133, 2018.

SANTOS, S. A.; SANTANA, H. E. P.; JESUS, M. S.; TORQUATO, I. A.; SANTOS, J.; PIRES, P.; RUZENE, D. S.; SILVA, D. P. Progress and Trends in Forage Cactus Silage Research: A Bibliometric Perspective. **Fermentation**, v. 10, n. 10, p. 531, 2024.

SILVA, D. F.; ROSA, R. C.; SANTOS, E. C. R.; JUNIOR, A. D. F.; DE MATOS, E. F.; BARROS, P. L. O.; DO CARMO, T. F. Diferença entre tratamentos com sementes de sorgo para silagem inoculadas com bactéria *Azospirillum* e diferentes doses de nitrogênio. **Anais da Semana Agronômica da Faculdade Evangélica de Goianésia**, v. 9, n. 1, 2019.

SILVA, M. A.; ALBUQUERQUE, T. G.; PEREIRA, P.; RAMALHO, R.; VICENTE, F.; OLIVEIRA, M. B. P.; COSTA, H. S. *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.: A multi-benefit potential to be exploited. **Molecules**, v. 26, n. 4, p. 951, 2021.

SILVA, M. L. R. B.; FIGUEIRÔA, C. S.; MERGULHÃO, A. C. D. E. S. Identificação de bactérias diazotróficas isoladas em cultivares de palma (*Opuntia* e *Nopalea*) usando o gene *recA*. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 2, p. 577-583, 2015.

SIMÕES, S. D. S.; ZAPPI, D. C.; AONA, L. Y. S. A família Cactaceae no Parque Nacional de Boa Nova, Estado da Bahia, Brasil. **Hoehnea**, p. 47, 2020.

SHAHID, M.; SINGH, U. B.; KHAN, M. S.; KHAN, M. S.; SINHG, P.; KUMAR, R.; SINGH, r. N.; KUMAR, A.; SINGH, H. V. Bacterial ACC deaminase: Insights into enzymology, biochemistry, genetics, and potential role in amelioration of environmental stress in crop plants. **Frontiers Microbiology**, v. 14, 2023.

VERGÜTZ, L. F.; LUDWIG, R. L. Inoculação via semente e foliar com *Azospirillum brasilense* em conjunto a doses de adubação nitrogenada em cobertura na cultura do trigo. In **6º SALÃO DE PESQUISA, EXTENSÃO E ENSINO DO IFRS**, 2021.

CAPÍTULO 1

Bactérias promotoras do crescimento e nutrição em palma forrageira em ambiente protegido

Bactérias promotoras do crescimento e nutrição em palma forrageira em ambiente protegido

RESUMO: Diversas plantas forrageiras têm o mecanismo de tolerância às condições de estresse por déficit hídrico, no entanto, a tolerância varia de acordo com cada espécie. Portanto, são necessários estudos para o desenvolvimento de tecnologias capazes de tornar as plantas mais resistentes a esse fator, promovendo assim o melhor desenvolvimento e produtividade. O uso de tecnologias como a inoculação de bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP) pode promover o aumento no crescimento de plantas forrageiras sob condições de estresse hídrico. Dessa forma, este estudo teve por objetivo avaliar o efeito da inoculação de bactérias promotoras do crescimento de plantas (BPCP) em palma forrageira (*Opuntia ficus indica* (L.) Mill), cv. *Gigante*, os parâmetros morfológicos e produção da cultura em condições de ambiente protegido. O estudo foi realizado na casa de vegetação da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia implantado em delineamento inteiramente casualizados com cinco isolados bacterianos e 12 dias de avaliação: controle (sem inoculante); *Azospirillum brasilense* Ab-V5 (CNPSO 2083); *Rhizobium tropici* CIAT 899 (CNPSO 103); *Azospirillum brasilense* Ab-V6 (CNPSO 2084); *Bacillus subtilis* (CNPSO 2657) sob 12 dias avaliação: 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 270, 300, 420 e 510. *Opuntia ficus-indica* concentrou seu crescimento na fase inicial e estabilizou após 150 dias. A utilização de bactérias promotoras do crescimento de plantas contribui positivamente para o desenvolvimento e produtividade da palma forrageira gigante, com redução dos custos de produção e aumento dos rendimentos, trazendo maior retorno econômico. A inoculação dos isolados *Azospirillum brasilense* Ab-V6 e *Rhizobium tropici* proporcionam maior acréscimo nos índices de desenvolvimento da planta e produtividade.

Palavras-chave: Bactérias endofíticas; Inoculantes Biológicos; Produtividade; Qualidade ambiental.

Plant Growth-Promoting Bacteria and Nutrition in Forage Cactus under Protected Environment

ABSTRACT: Several forage species possess mechanisms that confer tolerance to water-deficit stress; however, the degree of tolerance varies among species. Therefore, studies are needed to develop technologies that make plants more resilient to this constraint, thereby improving growth and productivity. The use of technologies such as inoculation with plant growth-promoting bacteria (PGPB) can enhance the growth of forage species under water-stress conditions. Accordingly, this study aimed to evaluate the effect of inoculating PGPB in forage cactus (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.), cv. Gigante, on morphological parameters and yield under protected (greenhouse) conditions. The experiment was conducted in the greenhouse of the Federal University of Recôncavo da Bahia using a completely randomized design with five bacterial isolates and 12 evaluation dates: control (no inoculant); *Azospirillum brasilense* Ab-V5 (CNPSo 2083); *Rhizobium tropici* CIAT 899 (CNPSo 103); *Azospirillum brasilense* Ab-V6 (CNPSo 2084); and *Bacillus subtilis* (CNPSo 2657), evaluated at 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 270, 300, 420, and 510 days. *Opuntia ficus-indica* concentrated its growth in the initial phase and stabilized after 150 days. Inoculation with plant growth-promoting bacteria contributed positively to the development and productivity of the 'Gigante' forage cactus, reducing production costs and increasing yields, thereby providing greater economic return. In particular, inoculation with *Azospirillum brasilense* Ab-V6 and *Rhizobium tropici* resulted in the greatest increases in plant development indices and yield.

Keywords: Endophytic bacteria; Biological inoculants; Productivity; Environmental quality.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas representam desafios significativos para diversas regiões do Brasil, especialmente no Semiárido. Os pequenos agricultores estão entre os mais vulneráveis aos impactos dessas alterações climáticas, pois enfrentam limitações socioeconômicas, escassez hídrica e dificuldades no acesso a tecnologias adaptativas (SLOT e FATILHA, 2024). Nesse contexto, o cultivo sustentável e bem manejado da palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill) se destaca como uma alternativa estratégica para a resiliência dos sistemas produtivos locais.

A palma forrageira especialmente o cultivar Gigante, é uma das principais alternativas alimentares para ruminantes em regiões semiáridas, devido à sua elevada capacidade de armazenamento de água, rusticidade e bom valor energético (QUEIROGA et al., 2020; DUBEUX et al., 2021; SANTOS et al., 2024). No entanto, apesar de sua ampla adaptabilidade, o desempenho agrônomico da cultura pode ser limitado por deficiências nutricionais decorrentes das características edafoclimáticas restritivas, como baixos teores de nutrientes e reduzida disponibilidade hídrica (JUNIOR et al., 2021; PESSOA et al., 2022). Diante desse cenário, estratégias sustentáveis de manejo da fertilidade do solo tornam-se essenciais para garantir a produtividade e a resiliência da cultura frente aos desafios ambientais.

Entre as tecnologias biológicas promissoras para o aumento da eficiência nutricional e do crescimento vegetal, destaca-se a utilização de bactérias promotoras do crescimento de plantas (BPCP). Esses microrganismos benéficos exercem múltiplos mecanismos de ação, incluindo a fixação biológica de nitrogênio, solubilização de fósforo e potássio (BARBOSA et al., 2022; LIU et al., 2022; LIU et al., 2024), produção de fitormônios (como auxinas e giberelinas) (ÇAKMAKÇI et al., 2020; OMOMOWO et al., 2022), além da indução de resistência sistêmica (SYED-AB-RAHMAN et al., 2019) e mitigação dos efeitos do estresse abiótico (PANDEY et al., 2019). Em sistemas agrícolas sob condições protegidas, o uso de BPCPs pode potencializar o desenvolvimento radicular, melhorar a absorção de nutrientes e favorecer a estabilidade produtiva mesmo em situações de restrição hídrica.

A aplicação de BPCPs na cultura da palma forrageira, embora ainda pouco explorada em comparação a outras culturas, representa uma estratégia viável e ambientalmente segura para melhorar a qualidade nutricional da forragem (MAMÉDIO et al., 2020) e no seu crescimento (LYRA et al., 2016) no semiárido. Diante disso, o objetivo do presente estudo foi avaliar o efeito da inoculação de bactérias promotoras do crescimento de plantas (BPCP) em palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill), cv. Gigante, sobre os parâmetros morfológicos e a produção da cultura em condições de ambiente protegido e estresse hídrico.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na casa de vegetação da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia entre os meses de julho de 2022 a maio de 2024, no município de Cruz das Almas-BA (coordenadas 12°65'894" S, 39°08'544" W, com uma altitude de 220 m). No período de realização do experimento, a precipitação acumulada foi de 1.653,8 mm, com temperatura máxima média de 28,5 °C, mínima média de 21,5 °C e média de 24,4 °C, segundo o INMET (estação automática A406).

A casa vegetação onde o experimento foi instalado possui tela de sombrite de 50%. A palma forrageira utilizada no experimento foi adquirida no município de Conceição do Coité-BA (11°43'36"S e 39°18'22"W), junto a produtores dessa região. Devido à presença predominante da vegetação de caatinga desse município, é considerado parte da região semiárida. Os cladódios foram armazenados em local arejado durante um período de 15 dias para a redução do teor de umidade antes de serem plantados.

Foram utilizados vasos de 2.6 dm³ contendo amostras de Latossolo Amarelo distrocoesos típicos, coletados na UFRB, a correção do solo e a adubação foi realizada mediante a análise química do solo, com fertilização nitrogenada 20 kg ha⁻¹ de ureia, sendo adquirido em casa agropecuária do referido município (Figura 1). O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5 × 12, correspondendo a cinco tratamentos com bactérias promotoras de crescimento e doze períodos de avaliação, com cinco repetições. Os tratamentos consistiram em: T0 – controle (sem inoculação); T1 – *Azospirillum brasilense* Ab-V6

(CNPSo 2084); T2 – *Rhizobium tropici* (CNPSo 103); T3 – *Azospirillum brasilense* Ab-V5 (CNPSo 2083); e T4 – *Bacillus subtilis* (CNPSo 2657) obtidos do acervo de microrganismos do Laboratório de Biotecnologia do Solo pertencente a Embrapa Soja. A inoculação foi realizada a partir da pulverização localizada próxima a raiz com volume de solução de 20 mL por planta. As avaliações foram realizadas aos 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 270, 300, 420 e 510 dias após o plantio (DAP).

Figura 1. Preparo de cladódios de palma forrageira em plantio em vasos em casa de vegetação



Fonte: Marcos Rodrigues, 2024

Amostras deformadas de solo foram coletadas nas camadas de 0 – 0,20 m de profundidade, secas ao ar, peneiradas em malha 2 mm e deixadas à sombra para secar e, na sequência foi realizada a caracterização granulométrica e química. A partir dessas amostras foi realizada a análise textural, além das análises químicas de pH em H₂O e KCl, análise de macronutrientes disponíveis do solo (TEIXEIRA et al., 2017; WALKLEY e BLACK, 1934). As análises química e física do solo estão descrita em: pH: 4,8 (água, 1:2,5); Ca²⁺: 5,00 mmol_c/kg; Mg²⁺: 3,00 mmol_c/kg; K⁺: 0,40 mmol_c/kg; Na⁺: 0,00 mmol_c/kg; SB: 8,40 mmol_c/kg; Al³⁺: 0,60 mmol_c/kg; H⁺ + Al³⁺: 8,00 mmol_c/kg; CTC (T): 37,00 mmol_c/kg; V%: 22,7%; m%: 21,62%; Na⁺/T: 0%; C: 0,51%; M.O: 0,89%; P: 20,60 mg/kg. Argila: 300 g/kg; Silte: 60 g/kg; Areia grossa: 390 g/kg; Areia fina: 250 g/kg; Areia total: 640 g/kg; Silte/Argila: 20% e Umidade higroscópica: 0,2%.

Após o plantio das mudas e inoculação das bactérias promotoras do crescimento de plantas foi avaliado o número de mudas que apresentaram brotação (simples ou duplas), bem como o número de brotação total por tratamento. A irrigação foi realizada a cada 20 dias adicionando com 200 mL de água por vaso.

A avaliação das mudas secundárias, foram avaliadas por meio das

características morfológicas e morfogênicas, mensalmente durante o ano 1 e 2. Como características morfológicas, foram consideradas as seguintes técnicas: comprimento; largura; espessura e área das plantas. Para mensuração destas características, utilizará fita métrica e paquímetro digital.

Como características morfogênicas, foram consideradas as seguintes características: número de cladódios (NC) surgidos por planta dividido pelo número de dias do período de avaliação – cladódio/planta/dia; comprimento do cladódios (CC), e aos 510 dias após o plantio, foram avaliadas largura do cladódios (LC), massa fresca do cladódios (MFC) e massa seca do cladódios (MSC). A taxa de crescimento absoluto (TCA) e a taxa de crescimento relativo (TCR) foram determinadas a partir do número de cladódios (NC) ao longo do tempo, de acordo com a metodologia adaptada de Peixoto et al. (2011), em que $TCA = (W2-W1)/(T2-T1) = \text{cm dia}^{-1}$ ou semana^{-1} . Onde, W1 e W2 é a variação do número de cladódios (NC) em duas amostras consecutivas tomadas nos tempos T1 e T2. Para calcular TCR, utilizou-se a formula: $TCR = (\ln W2 - \ln W1) / (T2 - T1) = \text{cm cm}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ou semana^{-1} , onde ln é o logaritmo neperiano; W1 e W2 representam a massa da matéria seca nos tempos T1 e T2.

Para avaliação nutricional das plantas, cada tratamento foi colhido, secos em estufa de circulação forçada à 45°C. As amostras serão moídas em moinho tipo Wiley, padronizado com peneira de 20 mesh, e acondicionadas em sacos plásticos. Aproximadamente em 0,1 g da massa seca dos cladódios serão submetidos à digestão ácida em uma mistura de 3,5 ml de ácido sulfúrico concentrado (H₂SO₄) e 3 ml de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) a 30%, conforme descrito em Jones (2001). O material digerido foi diluído para 100 ml com água destilada, obtendo-se assim o extrato para realização das análises de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S). Os teores de N foram determinados pelo método espectrofotométrico do fenol-hipoclorito (WEATHERBURN, 1967), os de P pelo método espectrofotométrico do molibdo-vanadato e os de K determinados por fotometria de chama (FAITHFULL, 2002).

Os dados foram submetidos à análise de variância utilizando o software R (R Core Team, 2025). Para a comparação entre da inoculação com isolados bacterianos, aplicou-se o teste de Scott-Knott a 5% de significância ($p \leq 0,05$), e a análise de regressão foi empregada para avaliar o efeito ao longo dos dias. A normalidade dos resíduos foi verificada por meio do teste de Shapiro-Wilk.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Não houve efeito significativo entre os tratamentos e os dias de avaliação para nenhuma das variáveis avaliadas, mas houve efeito individual para ambos os fatores ($p < 0,05$). Para a variável número de cladódios (NC) e o comprimento médio de cladódios (CMC), foi observado efeito isolado tanto da inoculação quanto dos dias de avaliação ($p < 0,05$). Plantas de *Opuntia ficus-indica* inoculadas com *Azospirillum brasilense* Ab-V6, *Rhizobium tropici*, *Bacillus subtilis* e o tratamento controle apresentaram valores médios de NC superiores aos obtidos com *Azospirillum brasilense* Ab-V5, com médias superiores a 0,80 cladódio por planta (Tabela 1). O número de cladódios representa uma característica agronomicamente relevante na palma forrageira, por estar fortemente correlacionado com a capacidade fotossintética da planta e produção de fitomassa (TELES et al., 2002; PINHEIRO et al., 2014).

Com relação ao CMC, as plantas inoculadas com *Rhizobium tropici* (20,04 cm cladódio⁻¹), *Bacillus subtilis* (19,52 cm cladódio⁻¹) e o controle (19,48 cm cladódio⁻¹) apresentaram médias significativamente superiores às inoculadas com *Azospirillum brasilense* Ab-V6 (16,31 cm cladódio⁻¹) e Ab-V5 (15,60 cm cladódio⁻¹) (Tabela 1). O efeito positivo dos isolados bacterianos no aumento do NC e do CC pode ser atribuído à interação benéfica entre as bactérias e a palma forrageira, promovendo melhorias na absorção de nutrientes, especialmente o nitrogênio. Esses benefícios podem refletir em maior sustentabilidade do sistema produtivo, conforme relatado por Mamédio et al. (2020). O desempenho superior do tratamento controle em relação a alguns isolados bacterianos pode estar associado a diversos fatores, como as condições edafoclimáticas do ambiente de cultivo com alta temperatura e estresse hídrico, que podem influenciar negativamente a eficácia da inoculação.

Tabela 1. Número de cladódios (NC) e comprimento médio de cladódios (CMC) de plantas *Opuntia ficus indica* inoculadas com bactérias promotoras do crescimento de plantas (*Azospirillum brasilense* Ab-V5 (CNPSO 2083); *Rhizobium tropici* CIAT 899 (CNPSO 103); *Azospirillum brasilense* Ab-V6 (CNPSO 2084); *Bacillus subtilis* (CNPSO 2657) e o controle (CT) ausente de inoculante) em condições controladas.

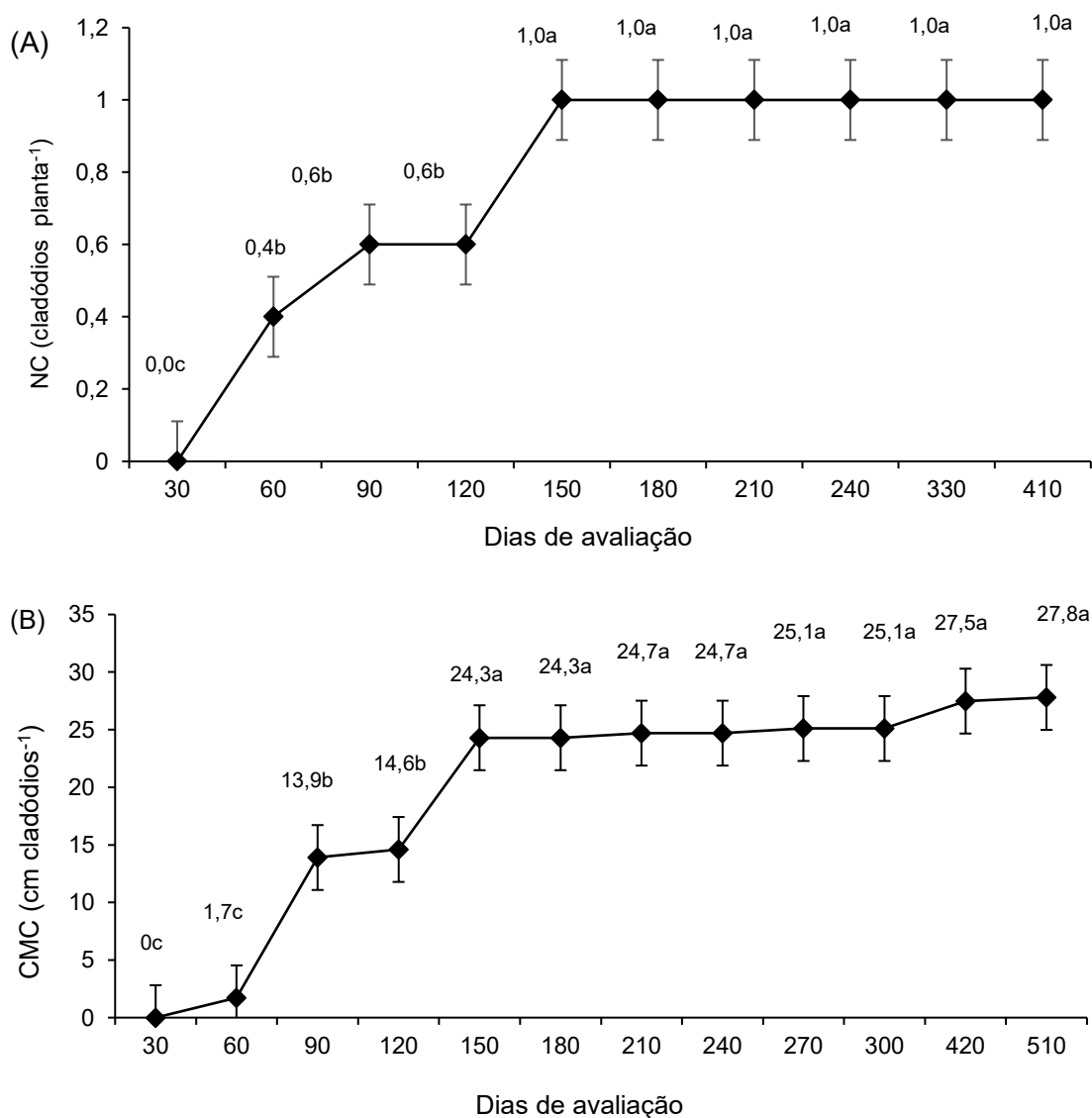
Isolados	NC (nº)	CMC (cm)
<i>Azospirillum brasiliense</i> Ab-V5	0,67b	15,60b
<i>Azospirillum brasiliense</i> Ab-V6	0,88a	16,31b
<i>Bacillus subtilis</i>	0,85a	19,52a
<i>Rhizobium tropici</i>	0,88a	20,04a
Controle	0,80a	19,48a
CV (%)	45,5	32,62

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si de acordo com o teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade

Além disso, a presença de um microbioma nativo no solo ou no sistema radicular, composto por microrganismos já eficientes na promoção do crescimento vegetal, pode ter contribuído para que o tratamento controle (sem inoculação) apresentasse competitividade suficiente em termos de absorção de nutrientes e tolerância a estresses abióticos (COSTA et al., 2016; FARIAS et al., 2016). Diversos estudos evidenciam o potencial de microrganismos associados à *Opuntia ficus-indica* tanto para a promoção de crescimento vegetal quanto para atividade antimicrobiana. Destacam-se actinobactérias endofíticas isoladas da raiz (GOVIDASAMY et al., 2022), o fungo endofítico *Aspergillus niger* (OL519514) isolado da casca do fruto (ELKADY et al., 2022) e cepas bacterianas obtidas de raízes, cladódios e frutos, como *Pseudomonas putida*, *P. brassicacearum* e *Klebsiella pneumoniae* (DRAOU et al., 2019).

Observou-se que, à medida que os dias de avaliação aumentaram, as médias de número de cladódios por planta (NC) também se elevaram significativamente até os 150 dias, quando atingiram a média máxima de 1 cladódio por planta. A partir de então, as médias permaneceram estatisticamente iguais até os 410 dias, indicando estabilização no crescimento (Figura 2A). Diferenças estatísticas foram identificadas entre os períodos de 30, 60 e 90 dias em relação aos demais, com incremento progressivo na emissão de cladódios, evidenciando atividade meristemática ativa e contínuo desenvolvimento vegetativo da espécie *Opuntia ficus-indica* (RATHGEBER et al., 2022; NOUR et al., 2024). No entanto, a ausência de diferença estatística entre os períodos de 150 a 410 dias sugere uma desaceleração temporária na emissão de novos cladódios, possivelmente relacionada a fatores fisiológicos como acúmulo de reservas, competição por assimilados ou resposta a condições ambientais menos favoráveis (ZHAO, 2024).

Figura 2. Número de cladódios (NC), comprimento do cladódios (CC) de plantas *Opuntia ficus indica* sobre diferentes dias de avaliação em condições controladas.



Para o comprimento médio dos cladódios (CMC), observa-se um crescimento contínuo no número de cladódios por planta (NC) ao longo dos 450 dias de avaliação, com aumento gradual até 330 dias e um incremento expressivo aos 450 dias, atingindo a média de 8 cladódios por planta (Figura 2B). As médias entre os períodos de 90 a 330 dias variaram entre 1,53 e 3,93 cladódios por planta, sem grandes saltos estatísticos, indicando uma taxa de emissão moderada e constante. No entanto, o acentuado aumento no período final (450 dias) evidencia uma intensificação no processo de brotação, possivelmente impulsionado pelo acúmulo de reservas, maturação fisiológica das plantas ou mudanças ambientais favoráveis.

Esse comportamento sugere que, diferentemente do comprimento dos cladódios, a emissão de novos cladódios pode estar associada a eventos fisiológicos específicos da espécie *Opuntia ficus-indica*, como superação de dormência de gemas, redistribuição de assimilados ou resposta a fatores sazonais. O padrão de crescimento observado reforça o potencial da espécie como cultura perene adaptada à ambientes semiáridos, capaz de sustentar produção vegetativa prolongada (LAHBOUK et al., 2022). Esse desempenho também está alinhado com estudos que destacam a eficiência dessa cactácea em converter água e nutrientes em biomassa ao longo do tempo, favorecida pelo metabolismo fotossintético CAM (LUÈTTGE, 2004; KHODAEIAMINJAN et al., 2021; NIECHAYEV et al., 2023).

Para a variável largura do cladódios (LC) avaliadas aos 450 dias após o plantio, não foram observadas diferenças significativas em função da inoculação com os isolados bacterianos. A ausência de diferenças significativas na largura dos cladódios (LC) aos 450 dias após o plantio pode estar relacionada à menor sensibilidade dessa variável morfológica aos efeitos da inoculação bacteriana, em comparação com outras características de crescimento. É possível que a largura dos cladódios seja mais influenciada por fatores genéticos da espécie ou por condições ambientais estáveis ao longo do ciclo, resultando em menor variação entre os tratamentos (NIECHAYEV et al., 2024; TAHIR et al., 2025). Além disso, os efeitos da inoculação podem ter se concentrado em outros aspectos do desenvolvimento vegetal, como o número ou o comprimento dos cladódios, sem impactar diretamente na expansão lateral das estruturas.

Os resultados obtidos para matéria fresca do cladódios (MFC) e matéria seca do cladódios (MSC) avaliados aos 510 após o plantio, indicam que a inoculação com *Azospirillum brasilense* Ab-V5 e Ab-V6 proporcionou os maiores acúmulos de biomassa em *Opuntia ficus-indica*, com valores de 409 e 453 g de MFF e 24,04 e 24,42 g planta⁻¹ de MSC, respectivamente (Tabela 2). Esses incrementos sugerem que ambas as estirpes de *A. brasilense* atuaram de maneira eficiente na promoção do crescimento vegetal, superando significativamente os demais tratamentos, os quais não apresentaram diferenças estatísticas entre si. O aumento na produção de biomassa pode estar associado aos mecanismos clássicos de promoção de crescimento atribuídos a *Azospirillum*, como a fixação biológica de nitrogênio, produção de fitormônios (principalmente auxinas), aumento da absorção de nutrientes

e estímulo ao desenvolvimento radicular (CRUZ-HERNÁNDEZ et al., 2022; JEHANI et al., 2023), resultando em maior eficiência na exploração do solo e maior acúmulo de matéria seca nos tecidos da planta. Além disso, *A. brasilense* é conhecido por atuar na modulação do estresse abiótico, o que pode favorecer o crescimento mesmo em ambientes com limitação hídrica ou nutricional, comuns em áreas semiáridas (SALAZAR-GARCIA et al., 2022; MARQUES et al., 2023; SUN et al., 2025).

Tabela 2. Matéria fresca do cladódios (MFC), matéria seca do cladódios (MSC) de plantas *Opuntia ficus indica* inoculadas com bactérias promotoras do crescimento de plantas (*Azospirillum brasilense* Ab-V5 (CNPSO 2083); *Rhizobium tropici* CIAT 899 (CNPSO 103); *Azospirillum brasilense* Ab-V6 (CNPSO 2084); *Bacillus subtilis* (CNPSO 2657) e o controle (CT) ausente de inoculante) em condições controladas.

Isolados	MFC(g)	MSC (g)
<i>Azospirillum brasiliense</i> Ab-V5	327,6b	17,32b
<i>Azospirillum brasiliense</i> Ab-V6	409,0a	22,04a
<i>Bacillus subtilis</i>	344,2b	15,78b
<i>Rhizobium tropici</i>	453,0a	24,42a
Controle	281,4b	13,18b
CV (%)	17,47	18,06

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si de acordo com o teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

A promoção do crescimento vegetal por bactérias fixadoras de N e promotoras de crescimento pode ser explicado pela fixação de nitrogênio atmosférico, solubilização de fosfato e produção de hormônios de crescimento como o ácido indol acético AIA, além do estímulo do sistema de defesa da planta com ataque de fitopatógenos (FIGUEIREDO, 2018).

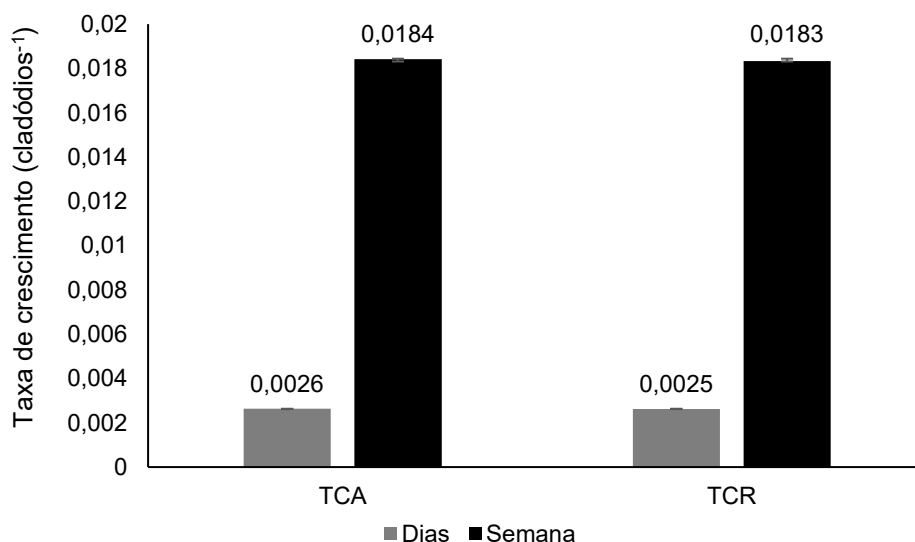
A ausência de diferenças significativas entre os demais tratamentos pode indicar que esses microrganismos, embora potencialmente benéficos, não apresentaram compatibilidade ideal com a espécie vegetal ou não conseguiram colonizar adequadamente o sistema radicular (CHIARINI et al., 1998) e/ou a superfície dos cladódios. Esse resultado reforça a importância da seleção de estirpes adaptadas às condições edafoclimáticas locais e compatíveis com a fisiologia da planta hospedeira (WANI et al., 2022).

O incremento no número de cladódios por planta refletiu positivamente na produtividade da palma forrageira, promovendo um aumento expressivo na biomassa verde (Tabela 1 e 3). Tal resultado é de grande relevância, uma vez que a biomassa

produzida atende simultaneamente às demandas do mercado consumidor, como alternativa alimentar para ruminantes ou até mesmo para o consumo humano direto ou, especialmente em regiões semiáridas (DUBEUX et al., 2021; SANTOS et al., 2024).

Em relação a taxa de crescimento absoluto (TCA) de plantas de *Opuntia ficus-indica* sob casa de vegetação, houve incrementos absolutos apenas em 30–60, 60–90 e 120–150 dias, depois disso, o NC permaneceu em 1 com médias de 0,0026 cladódios dia⁻¹ e 0,0184 cladódios semana⁻¹ (Figura 3). Na taxa de crescimento relativo (TCR), o crescimento ocorreu em 60–90 e 120–150 dias com médias de 0,0102 cladódios dia⁻¹ e 0,0713 cladódios semana⁻¹, isso indica crescimento proporcional acelerado durante o estabelecimento, quando o estoque inicial é pequeno, após 150 dias, NC ficou estável com 0,0025 cladódios dia⁻¹ e 0,0183 cladódios semana⁻¹.

Figura 3. Taxas do crescimento absoluto (TCA) e relativo (TCR) a partir do número de cladódios de plantas *Opuntia ficus indica* ao longo do tempo (30 – 450 dias), descrita em dias⁻¹ e semana⁻¹ em condições de campo.



A ausência de crescimento após 150 dias (Figura 3) sugere limitação de recursos e/ou restrição de espaço do recipiente, além de possível transição ontogenética que reduz a emissão de novos cladódios. Sendo importante, ajustar volume de vaso, disponibilidade hídrica e nutricional e manejo de luz para ampliar a janela de emissão. De acordo com Peixoto et al. (2011), a TCR varia ao longo do ciclo

vegetativo porque depende de dois determinantes do crescimento, a razão de área foliar, que expressa a área foliar efetivamente disponível para fotossíntese por unidade de biomassa, e a taxa assimilatória líquida, que corresponde à fotossíntese líquida, ou seja, à fotossíntese bruta menos as perdas por respiração.

O tratamento com *Bacillus subtilis* (T4) foi o mais eficaz, destacando-se pelo aumento simultâneo dos teores de nitrogênio (N), fósforo (P), cobre (Cu), manganês, zinco e boro, além de promover uma redução significativa nos teores de sódio (Na) (Tabela 3). Essa redução do sódio pode indicar um efeito salino protetor, frequentemente relatado na literatura para espécies do gênero *Bacillus*, que auxiliam na mitigação do estresse salino por meio da regulação osmótica e do equilíbrio iônico (IBARRA-VILLARREAL *et al.*, 2021; HASANUZZAMAN *et al.*, 2022; HOSSAIN & ISLAM, 2022). O acúmulo eficiente de nutrientes essenciais, aliado à redução do Na⁺, contribui para a melhoria do estado nutricional da planta, com reflexos positivos no crescimento, metabolismo e tolerância a estresses abióticos, como a salinidade e a seca, comuns em regiões semiáridas (KUMARI *et al.*, 2022; SINGHAL *et al.*, 2023).

Por outro lado, o tratamento com *Rhizobium tropici* (T2) apresentou menores teores de alguns macronutrientes, como N e P, sugerindo menor eficiência dessa bactéria na promoção da nutrição mineral da palma forrageira (Tabela 3). Tal resultado pode estar relacionado à baixa compatibilidade entre o isolado e a espécie vegetal, à limitada adaptação da estirpe ao ambiente experimental, ou ainda à menor capacidade de colonização e sobrevivência na rizosfera da palma. Esses aspectos reforçam a importância de selecionar microrganismos com elevada capacidade adaptativa, além de considerar a especificidade da interação planta-microrganismo (SHILEV *et al.*, 2019; KOU *et al.*, 2024).

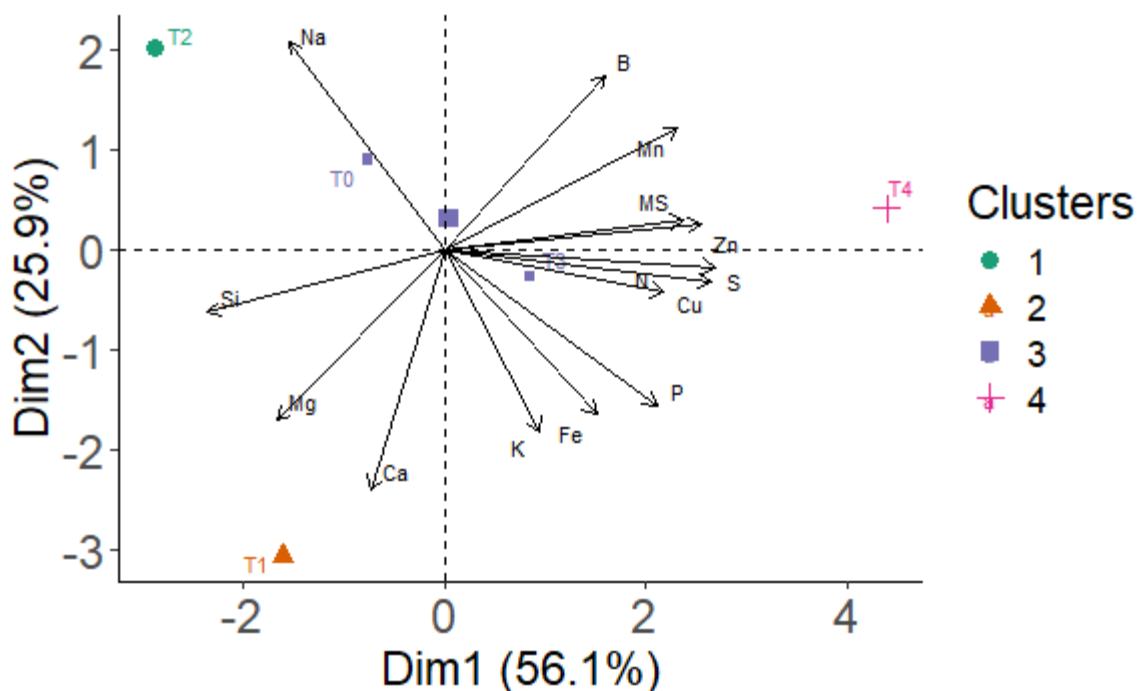
Tabela 3. Teores nutricionais de palma forrageira após inoculação com bactérias promotoras de crescimento de plantas (T0-controle; T1- *Azospirillum brasiliense* Ab-V6 CNPSo 2084; T2- *Rhizobium tropici* CNPSo 103; T3-*Azospirillum brasiliense* Ab-V5 CNPSo 2083; T4- *Bacillus subtilis* CNPSo 2657) cultivados em ambiente protegido.

Elemento/teor	MACRONUTRIENTES				
	T0	T1	T2	T3	T4
Matéria Seca (%)	4,7	5,4	5,4	5,3	22,3
Nitrogênio (g/kg)	21,3	17,9	13,9	21,1	22,3
Fósforo (g/kg)	3,1	3,9	2,9	3,6	4,3
Potássio (g/kg)	21,1	21,3	16,2	19,5	20,1

Cálcio (g/kg)	16,2	18,8	15,8	15,7	16,1
Magnésio (g/kg)	16,3	21,5	19,2	17,7	16,4
Enxofre (g/kg)	2,1	2,0	1,8	2,3	2,6
MICRONUTRIENTES					
Elemento/teor	T0	T1	T2	T3	T4
Ferro (mg/kg)	31,6	43,4	33,7	46,4	43,9
Cobre (mg/kg)	7,1	6,6	5,4	7,4	9,0
Manganês (mg/kg)	206,7	180,2	200,3	225,2	238,0
Zinco (mg/kg)	33,5	33,8	34,4	41,6	47,8
Boro (mg/kg)	45,0	37,7	56,4	46,4	66,0
Molibidênio (mg/kg)	<LQ	0,14	<LQ	<LQ	<LQ
ELEMENTOS BENÉFICOS					
Elemento/teor	T0	T1	T2	T3	T4
Sódio (mg/kg)	512,9	108,2	565,5	173,4	143,4
Silício (mg/kg)	166,6	187,9	187,4	184,3	130,8

A PCA explicou 82,0% da variância (PC1=56,1%; PC2=25,9%) (Figura 3). O PC1 separa P–K–Fe–S–Cu (e Zn) à direita de Na–Ca–Mg–Si à esquerda, o PC2 coloca B–Mn–Na–MS (biomassa seca) acima e P–K–Fe–S–Cu abaixo. Há correlação entre P–K–Fe–S–Cu e entre B–Mn, já o Na é antagônico a P/K/Fe/S, enquanto que, Ca–Mg caminham juntos e Si acompanha Na. No mapa, T4 (*B. subtilis*) está no superior direito (associado a Zn–B–Mn e maior MS), T2 (Ab-V5) no superior esquerdo (Na–Si), T1 (*R. tropici*) no inferior esquerdo (Ca–Mg) e T0 (controle) próximo à origem, as demais do cluster 3 aparecem no inferior direito (polo P–K–Fe–S/Cu). Os deslocamentos para o positivo de PC1 indicam perfil nutricional mais favorável, o quadrante superior direito adiciona Zn–B–Mn e biomassa, sugerindo ganho funcional. Já o superior esquerdo (Ab-V5–T2) revela assinatura salina com provável antagonismo a P–K–Fe–S, e o inferior esquerdo (*R. tropici*–T1) indica dominância Ca–Mg que pode tamponar o meio e reduzir a disponibilidade relativa de P/Fe. Manejo que aproxime os tratamentos do polo P–K–Fe–S (e Cu), com Zn–B–Mn moderados e Na controlado, tende a otimizar o balanço nutricional e a produção.

Figura 3. Gráfico com as setas representando as contribuições de cada variável na análise de Análise de Componentes Principais (ACP) para as análises nutricionais.



Assim, os resultados demonstram o potencial das BPCPs, em especial *Bacillus subtilis* e *Azospirillum brasilense*, como biotecnologia promissoras para o manejo biológico da nutrição da palma forrageira, podendo contribuir para sistemas de produção mais sustentáveis e eficientes no uso de nutrientes, sobretudo em ambientes de baixa fertilidade ou sob condições de estresse abiótico.

4. CONCLUSÕES

Em ambiente protegido sob estresse hídrico, *Opuntia ficus-indica* concentrou o crescimento na fase inicial e estabilizou após 150 dias.

A inoculação com BPCPs incrementou crescimento, biomassa e acúmulo de nutrientes da palma forrageira cv. Gigante. Os isolados *Azospirillum brasilense* Ab-V6 e *Rhizobium tropici* maximizaram a biomassa; *Bacillus subtilis* e *R. tropici* alongaram os cladódios, enquanto Ab-V5 apresentou menor emissão e comprimento.

Nutricionalmente, *B. subtilis* elevou P, S e micronutrientes, e Ab-V6 promoveu a maior redução de Na. A inoculação com BPCPs é uma estratégia viável para aprimorar o desempenho agrônomo e nutricional em regiões semiáridas.

5. REFERENCIAS

BARBOSA, J. Z.; ROBERTO, L. A.; HUNGRIA, M.; CORRÊA, R. S.; MAGRI, E.; CORREIA, T. D. Meta-analysis of maize responses to *Azospirillum brasilense* inoculation in Brazil: Benefits and lessons to improve inoculation efficiency. **Applied Soil Ecology**, v. 170, p. 104276, 2022.

ÇAKMAKÇI, R.; MOSBER, G.; MILTON, A.H.; ALATÜRK, F.; ALI, B. The Effect of Auxin and Auxin-Producing Bacteria on the Growth, Essential Oil Yield, and Composition in Medicinal and Aromatic Plants. **Current Microbiology**. v.77, p.564-577, 2020.

COSTA, E. M.; CARVALHO, F.; NÓBREGA, R. S. A.; SILVA, J. S.; MOREIRA, F. M. S. Bacterial strains from floodplain soils perform different plant-growth promoting processes and enhance cowpea growth. **Scientia Agrícola**, v. 73, n. 4, p. 301-310, 2016.

CHIARINI, L.; BEVIVINO, A.; DALMASTRI, C.; NACAMULLI, C.; TABACCHIONI, S. Influence of plant development, cultivar and soil type on microbial colonization of maize roots. **Applied Soil Ecology**, v. 8, n. 1–3, p. 11-18, 1998.

CRUZ-HERNÁNDEZ, M. A.; MENDOZA-HERRERA, A.; BOCANEGRA-GARCÍA, V.; RIVERA, G. *Azospirillum* spp. from plant growth-promoting bacteria to their use in bioremediation. **Microorganisms**, v. 10, n. 5, p. 1057, 2022.

DRAOU, N. SELAMI, N.; KARKACHI, N.; KACEM, M.; HARCHE, K. Isolation and characterization of plant growth-promoting rhizobacteria from *Opuntia ficus-indica* and their effect on Wheat growth. **South Asian Journal of Experimental Biology**, v. 9, n. 6, p. 255, 2019.

ELKADY, W. M.; RAAFAT, M. M.; ABDEL-AZIZ, M. M.; AL-HUQAIL, A. A.; ASHOUR, M. L.; FATHALLAH, N. Endophytic fungus from *Opuntia ficus-indica*: a source of potential bioactive antimicrobial compounds against multidrug-resistant bacteria. **Plants**, v. 11, n. 8, p. 1070, 2022.

FARIAS, T. P.; SOARES, B. L.; ARAÚJO, A. R. A.; MOREIRA, F. M. S. Symbiotic efficiency of rhizobia strains with cowpea in southern Maranhão. **Revista Caatinga**, v. 29, n. 3, p. 611-618, 2016.

GOVINDASAMY, V.; GEORGE, P.; RAMESH, S. V.; SURESHKUMAR, P.; RANE, J.; MINHAS, P. S. Characterization of root-endophytic actinobacteria from cactus (*Opuntia ficus-indica*) for plant growth promoting traits. **Archives of Microbiology**, v. 204, n. 2, p. 150, 2022.

HASANUZZAMAN, M.; RAIHAN, M. R. H.; NOWROZ, F.; FUJITA, M. Insight into the mechanism of salt-induced oxidative stress tolerance in soybean by the application of *Bacillus subtilis*: coordinated actions of osmoregulation, ion homeostasis, antioxidant

defense, and methylglyoxal detoxification. **Antioxidants**, v. 11, n. 10, 1856, 2022.

HOSSAIN, M. T.; ISLAM, T. Amelioration of salinity stress by *Bacillus* species as promoters of plant growth in saline soil. In: **Bacilli in Agrobiotechnology: Plant Stress Tolerance, Bioremediation, and Bioprospecting**. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 199-208.

JEHANI, M. D.; SINGH, S.; KUMAR, D.; KUMAR, G. *Azospirillum*—A free-living nitrogen-fixing bacterium. In **Rhizobiome** (pp. 285-308). Academic Press, 2023.

JUNIOR, O. S. X.; JARDIM, A. M. D. R. F.; DE SOUZA, L. S. B.; DE SOUZA, C. A. A.; DA CRUZ NETO, J. F.; JÚNIOR, G. D. N. A.; LEITE, R. M.; C.; SILVA, T. G. F. Utilização de biofertilizantes alternativos no cultivo de palma forrageira: Uma revisão. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 10, n. 6, p. e46110616024-e46110616024. 2021.

KOU, C., SONG, F., LI, D., XU, H., ZHANG, S., YANG, W.; SHI, W.; GAO, Z. A necessary considering factor for crop resistance: precise regulation and effective utilization of beneficial microorganisms. **New Crops**, p. 100023, 2014.

KUMARI, V. V., BANERJEE, P., VERMA, V. C., SUKUMARAN, S., CHANDRAN, M. A. S., GOPINATH, K. A.; VENKATESH, G.; YDAV, S. K.; SINGH, V. K.; AWASTHI, N. K. Plant nutrition: An effective way to alleviate abiotic stress in agricultural crops. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 15, p. 8519, 2022.

KHODAEIAMINJAN, M.; NASSRALLAH, A. A.; KAMAL, Y. K. Potential attribute of Crassulacean acid metabolism of *Opuntia* spp. production in water-limited conditions. **Opuntia spp.: chemistry, bioactivity and industrial applications**, p. 201-218, 2021.

LAHBOUK, S.; ECH-CHATIR, L.; ER-RAK, S.; OUTZOURHIT, A.; MEDDICH, A. Improving drought tolerance of *Opuntia ficus-indica* under field using subsurface water retention technology: changes in physiological and biochemical parameters. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 102, n. 4, 2022.

LI, X.; LIU, Y.; LI, Y.; HAN, H.; ZHANG, H.; JI, M.; CHEN, Z. Enhancing mechanisms of the plant growth-promoting bacterial strain *Brevibacillus* sp. SR-9 on cadmium enrichment in sweet sorghum by metagenomic and transcriptomic analysis. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 23, p. 16309, 2022. <https://doi.org/10.3390/ijerph192316309>

LIU, Y.; ZHANG, H.; HAN, H.; LI, Y.; CHEN, Z. Plant growth-promoting bacteria improve the Cd phytoremediation efficiency of soils contaminated with PE–Cd complex pollution by influencing the rhizosphere microbiome of sorghum. **Journal of Hazardous Materials**, v. 469, p. 134085, 2024.

LUÈTTGE, U. Ecophysiology of Crassulacean Acid Metabolism (CAM). **Annals of Botany**, v. 93, p. 629±652, 2004.

NIECHAYEV, N. A.; MAYER, J. A.; CUSHMAN, J. C. Developmental dynamics of Crassulacean acid metabolism (CAM) in *Opuntia ficus-indica*. **Annals of Botany**, v. 132, n. 4, p. 869-879, 2023.

NIECHAYEV, N. A.; PEREIRA, P. N.; CUSHMAN, J. C. The Nitrogen Preference of Cactus Pear (*Opuntia ficus-indica*): A Sand Culture Snapshot. **Plants**, v. 13, n. 24, p. 3489, 2024.

NOUR, M. M.; ALJABI, H. R.; AL-HUQAIL, A. A.; HORNEBURG, B.; MOHAMMED, A. E.; ALOTAIBI, M. O. Drought responses and adaptation in plants differing in life-form. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 12, p.1452427, 2024.

OMOMOWO, O.I.; BABALOLA, O.O. Genomic Insights into Two Endophytic Strains: *Stenotrophomonas geniculata* NWUBe21 and *Pseudomonas carnis* NWUBe30 from Cowpea with Plant Growth-Stimulating Attributes. **Applied Sciences**, v.12, p.1-17, 2022.

PESSOA, R. M. S.; PESSOA, A. M. S.; COSTA, D. C. C. C.; AZEVÊDO, P. C. S.; GOIS, G. C.; CAMPOS, F. S.; VICENTE, S. L. A.; FERREIRA, J. M. S.; LIMA, D. O. Palma forrageira: Adubação orgânica e mineral. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 11, n. 13, p. e12111334267-e12111334267, 2022.

PEIXOTO, C. P.; CRUZ, T. V.; PEIXETO, M. F. S. P. Análise quantitativa do crescimento de plantas: Conceitos e Prática. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v. 7, n.13, 2011.

PINHEIRO, K. M.; SILVA, T. G. F. D.; CARVALHO, H. F. D. S.; SANTOS, J. E. O.; MORAIS, J. E. F. D.; ZOLNIER, S.; SANTOS, D. C. D. Correlações do índice de área do cladódio com características morfogênicas e produtivas da palma forrageira. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v. 49, p. 939-947, 2014.

RATHGEBER, C. B.; PÉREZ-DE-LIS, G.; FERNÁNDEZ-DE-UÑA, L.; FONTI, P.; ROSSI, S.; TREYDTE, K.; PONTON, S. Anatomical, developmental and physiological bases of tree-ring formation in relation to environmental factors. **In Stable isotopes in tree rings: Inferring physiological, climatic and environmental responses**. Cham: Springer International Publishing, 2022, p. 61-99.

SALAZAR-GARCIA, G.; BALAGUERA-LOPEZ, H. E.; HERNANDEZ, J. P. Effect of plant growth-promoting bacteria *Azospirillum brasilense* on the physiology of radish (*Raphanus sativus* L.) under waterlogging stress. **Agronomy**, v. 12, n. 3, p. 726, 2022.

SANTOS, S. A.; SANTANA, H. E. P.; JESUS, M. S.; TORQUATO, I. A.; SANTOS, J.; PIRES, P.; RUZENE, D. S.; SILVA, D. P. Progress and Trends in Forage Cactus Silage Research: A Bibliometric Perspective. **Fermentation**, v. 10, n. 10, p. 531, 2024.

SINGHAL, R. K.; FAHAD, S.; KUMAR, P.; CHOYAL, P.; JAVED, T.; JINGER, D.; SINGH, P.; SAHA, D.; MD, P.; BOSE, B.; AKASH, H.; GUPTA, N. K.; SODANI, R.; DEV, D.; SUTHAR, D. L.; LIU, K.; HARRISON, M. T.; SAUD, S.; SHAH, A. N.; NAWAZ, T. Beneficial elements: New Players in improving nutrient use efficiency and

abiotic stress tolerance. **Plant Growth Regulation**, v. 100, n. 2, p. 237-265, 2023.

SUN, W.; SHAHRAJABIAN, M. H.; WANG, N. A Study of the Different Strains of the Genus *Azospirillum* spp. on Increasing Productivity and Stress Resilience in Plants. **Plants**, v. 14, n. 2, p. 267, 2025.

SHILEV, S.; AZAIZEH, H.; VASSILEV, N.; GEORGIEV, D.; BABRIKOVA, I. Interactions in soil-microbe-plant system: adaptation to stressed agriculture. **Microbial Interventions in Agriculture and Environment: Volume 1: Research Trends, Priorities and Prospects**, p. 131-171, 2019.

SYED-AB-RAHMAN, S.F.; CARVALHAIS, L.C.; CHUA, E.T.; CHUNG, F.Y.; MOYLE, P.M.; ELTANAHY, E.G.; SCHENK, P.M. Soil bacterial diffusible and volatile organic compounds inhibit *Phytophthora capsici* and promote plant growth. **Science of the Total Environment**, v.692, p.267-280, 2019.

TAHIRI, A.; AIT AABD, N.; QESSAOUI, R.; MIMOUNI, A.; BOUHARROUD, R. Genetic Diversity and Breeding of Cactus (*Opuntia* spp.). In **Breeding of Ornamental Crops: Potted Plants and Shrubs** (pp. 153-193). Cham: Springer Nature Switzerland, 2025.

TELES, M. M.; SANTOS, M. V. F. D.; DUBEUX JÚNIOR, J. C. B.; BEZERRA NETO, E.; FERREIRA, R. L. C.; LUCENA, J. E. C.; LIRA, M. D. A. Efeitos da adubação e de nematicida no crescimento e na produção da palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill.) cv. Gigante. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.31, n.1, p.52-60, 2002.

WANI, A. K.; AKHTAR, N.; SHER, F.; NAVARRETE, A. A.; AMÉRICO-PINHEIRO, J. H. P. Microbial adaptation to different environmental conditions: molecular perspective of evolved genetic and cellular systems. **Archives of Microbiology**, v. 204, n. 2, p. 144, 2022.

ZHAO, G. Plant compensatory growth: its mechanisms and implications to agricultural sustainability under global environmental changes. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 31, n. 3, p. 348-360, 2024.

CAPÍTULO 2

Produção e nutrição de palma forrageira com uso de bactérias promotoras de crescimento de plantas em campo de cultivo

Produção e nutrição de palma forrageira com uso de bactérias promotoras de crescimento de plantas em campo de cultivo

RESUMO: Diversas forrageiras apresentam tolerância ao estresse hídrico, mas essa capacidade varia entre espécies. A palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill.), cultivada em regiões semiáridas, é reconhecida por sua resistência à seca. Buscando intensificar seu desenvolvimento e produtividade, este estudo avaliou os efeitos da inoculação com bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCPs) nos parâmetros morfológicos, nutricionais e na produção da palma forrageira cv. Gigante, sob condições de sequeiro. O estudo foi realizado na área experimental da Fazenda Vitória, localizada no município de Conceição do Coité, Bahia entre junho de 2022 a abril de 2024, implantado em blocos inteiramente casualizados com cinco tratamentos e tres repetições sendo: controle (sem inoculante); *Azospirillum brasilense* Ab-V5 (CNPSo 2083); *Rhizobium tropici* CIAT 899 (CNPSo 103); *Azospirillum brasilense* Ab-V6 (CNPSo 2084); *Bacillus subtilis* (CNPSo 2657) sob 10 avaliações (30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 330 e 450 dias após o plantio), com três repetições. A inoculação com bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCPs) influenciou positivamente o desenvolvimento da palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill.) cultivar Gigante em condições de sequeiro. Houve aumento significativo no número e comprimento dos cladódios ao longo dos 450 dias de avaliação, com destaque para os tratamentos com *Bacillus subtilis* e *Azospirillum brasilense* (Ab-V5 e Ab-V6), que promoveram maior brotação e crescimento longitudinal, respectivamente. A inoculação apresentou maior acúmulo de matéria seca e incremento nos teores de macro e micronutrientes, a partir da análise nutricional. O uso de BPCPs é uma estratégia eficaz e sustentável para melhorar o desempenho produtivo e nutricional da palma forrageira em regiões semiáridas.

Palavras-chave: Inoculantes biológicos; Produtividade; Qualidade ambiental.

Production and Nutrition of Forage Cactus with the Use of Plant Growth-Promoting Bacteria in Field Cultivation

ABSTRACT: Several forage species exhibit tolerance to water deficit stress, although this capacity varies among species. The forage cactus (*Opuntia ficus-indica* Mill.), widely cultivated in semi-arid regions, is recognized for its drought resistance. Aiming to enhance its development and productivity, this study evaluated the effects of inoculation with plant growth-promoting bacteria (PGPBs) on morphological, nutritional, and yield parameters of the forage cactus cv. Gigante under rainfed conditions. The experiment was conducted at the experimental area of Fazenda Vitória, located in the municipality of Conceição do Coité, Bahia, from June 2022 to April 2024, in a completely randomized block design with five treatments and three replicates: control (non-inoculated); *Azospirillum brasilense* Ab-V5 (CNPSo 2083); *Rhizobium tropici* CIAT 899 (CNPSo 103); *Azospirillum brasilense* Ab-V6 (CNPSo 2084); and *Bacillus subtilis* (CNPSo 2657), evaluated over ten time points (30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 330, and 450 days after planting). Inoculation with PGPBs positively influenced the development of *Opuntia ficus-indica* cv. Gigante under rainfed conditions. There was a significant increase in the number and length of cladodes throughout the 450-day evaluation period, with notable effects from *Bacillus subtilis* and *Azospirillum brasilense* (Ab-V5 and Ab-V6), which promoted greater sprouting and longitudinal growth, respectively. Nutritional analysis revealed that inoculated plants had higher dry matter accumulation and increased levels of macro- and micronutrients. The use of PGPBs is an effective and sustainable strategy to enhance the productive and nutritional performance of forage cactus in semi-arid regions.

Keywords: Biological inoculants; Productivity; Environmental quality.

1. INTRODUÇÃO

A palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill), notadamente o cultivar Gigante, é uma cactácea amplamente cultivada em regiões semiáridas, destacando-se por sua elevada resistência à seca, capacidade de armazenamento de água nos cladódios e versatilidade de uso (DUBEUX et al., 2021; ARAÚJO et al., 2023; SANTOS et al., 2024). Tradicionalmente utilizada como fonte estratégica de alimento para ruminantes, principalmente em períodos de escassez hídrica (DUBEUX et al., 2021; SANTOS et al., 2024), a palma também apresenta potencial significativo para a alimentação humana, por ser rica em fibras, compostos bioativos e micronutrientes como cálcio, magnésio, potássio e vitaminas do complexo B e C (BELHADJ SLIMEN; NAJAR; ABDERRABBA, 2020; ARAÚJO et al., 2021).

No âmbito da alimentação animal, os cladódios da palma constituem uma fonte importante de energia e água, contribuindo para a manutenção do metabolismo e do conforto térmico dos animais, sobretudo em sistemas de produção extensivos (MACÊDO et al., 2020; QUEIROGA et al., 2020). Apesar de seu baixo teor proteico (SANTOS; DOS SANTOS, 2018; QUEIROGA et al., 2020), a associação com fontes proteicas suplementares permite o balanceamento da dieta, assegurando ganhos satisfatórios em produtividade (SANTOS; DOS SANTOS, 2018; QUEIROGA et al., 2020).

Entretanto, o pleno aproveitamento do potencial produtivo e nutricional da palma forrageira depende de práticas de manejo adequadas, especialmente quanto à adubação. Solos de baixa fertilidade e limitada disponibilidade hídrica, comuns em áreas semiáridas, comprometem o crescimento e o valor nutricional da cultura (JUNIOR et al., 2021). E o uso de bactérias promotoras do crescimento de plantas (BPCP) configura-se como uma estratégia biotecnológica inovadora, com potencial para otimizar a nutrição vegetal por meio de múltiplos mecanismos como fixação de nitrogênio (OLANREWAJU et al., 2017; LOPES et al., 2021; BARBOSA et al., 2022), tornando esse nutriente disponível às plantas de forma sustentável, pela capacidade de solubilizar formas insolúveis de fósforo e potássio no solo e biossíntese de fitormônios, promovendo desenvolvimento radicular e diferenciação e aumentando sua disponibilidade para absorção radicular (GUIMARÃES et al., 2017; LIU et al., 2024; SILVA et al., 2020; HAKIM et al., 2020). Além de induzirem maior tolerância ao

estresse abiótico (seca, salinidade, temperaturas extremas), por meio da modulação de vias fisiológicas e do aumento na produção de osmoprotetores e enzimas antioxidantes (HUNGRIA et al., 2015; GUIMARÃES et al., 2017; FUKAMI et al., 2017), resultando em ganhos no crescimento, na absorção de nutrientes e na qualidade da biomassa produzida.

Em estudo conduzido em condições de campo para avaliar o efeito da biofertilização por meio da inoculação de *Pseudomonas* sp., *Enterobacter* sp. e *Paenibacillus* sp. em *Opuntia ficus-indica*, observou-se que o tratamento composto por esterco bovino associado ao bioinoculante resultou nos maiores teores de fibra crua (9,2%) e flavonoides (1,20 mg EQ/g), evidenciando um efeito positivo da biofertilização sobre as características nutricionais e funcionais da planta (ORTIZ-RODRIGUEZ et al., 2025). No entanto, esse mesmo tratamento apresentou o menor teor de matéria seca (9,9%) e uma baixa produção de biomassa (18,8 kg por corte), desempenho inferior ao observado no tratamento com esterco bovino isolado, que alcançou 25,0 kg por corte.

A aplicação de BPCPs em sistemas de cultivo da palma forrageira em condições de sequeiro ainda é pouco explorada, especialmente sob condições de campo. Avaliar a contribuição desses bioinsumos pode fortalecer estratégias sustentáveis de produção forrageira e alimentar, com potencial para reduzir a dependência de fertilizantes sintéticos e aumentar a resiliência dos sistemas agrícolas semiáridos. Diante disso, este estudo teve por objetivo avaliar o efeito da inoculação de bactérias promotoras do crescimento de plantas (BPCP) em palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill), cv. Gigante, sobre os parâmetros morfológicos, nutricionais e a produção da cultura em condições de sequeiro.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na Fazenda Vitória do proprietário Misael Ferreira localizado no município de Conceição do Coité, Bahia, nas coordenadas geográficas 11°43'36"S e 39°18'22"W, localizado no Nordeste do Brasil, entre os meses de julho de 2022 a maio de 2024, período referente a dois anos agrícolas. A região faz parte do semiárido do Brasil, com clima classificado como tropical, com temperatura média

anual de 25,5°C, pluviosidade média mensal superior a 56 mm e anual superior a 600 mm, e umidade relativa do ar de aproximadamente 70% (KÖPPEN, 1948).

O solo predominante na área é classificado como solo predominante na área, anteriormente descrito como 'halomórfico', corresponde a Planossolo Nátrico (caráter sódico) segundo o SiBCS (6ª ed.). e Vertissolos (SANTOS *et al.*, 2018; SANTOS *et al.*, 2025). Amostras deformadas de solo foram coletadas nas camadas de 0 – 0,20 m de profundidade, secas ao ar, peneiradas em malha 2 mm e deixadas à sombra para secar e, na sequência foi realizada a caracterização granulométrica e química.

A partir dessas amostras foi realizada a análise textural, além das análises químicas de pH em H₂O, análise de macronutrientes disponíveis (TEIXEIRA *et al.*, 2017) e carbono orgânico do solo (WALKLEY e BLACK, 1934). As análises do solo estão descritas em: O solo apresentou pH em água de 4,50, com teor de fósforo (P) de 14 mg/dm³ e potássio (K) de 56 mg/dm³. A soma de cálcio e magnésio (Ca + Mg) foi de 1,6 cmol/dm³, sendo 1,0 cmol/dm³ de cálcio (Ca²⁺) e 0,6 cmol/dm³ de magnésio (Mg²⁺). O teor de alumínio trocável (Al³⁺) foi de 0,2 cmol/dm³, enquanto a acidez potencial (H⁺ + Al³⁺) foi de 2,40 cmol/dm³. O sódio (Na⁺) apresentou 0,040 cmol/dm³ e o enxofre (S) 1,78 cmol/dm³. A capacidade de troca catiônica (CTC) foi de 4,18 cmol/dm³, com saturação por bases (V%) de 42,58% e teor de matéria orgânica (M.O.) de 1,23%. Quanto à análise física, o solo apresentou 300 g/kg de argila, 60 g/kg de silte, 390 g/kg de areia grossa e 250 g/kg de areia fina, totalizando 640 g/kg de areia. A relação silte/argila foi de 20% e a umidade higroscópica foi de 0,2%.

A palma forrageira utilizada no experimento foi adquirida e coletada no município de Conceição do Coité-BA, junto a produtores dessa região, posteriormente armazenado em local arejado durante um período de 15 dias para a redução do teor de umidade antes de ser plantada.

O adubo químico (Ureia) que foi utilizado no experimento foi adquirido em casa agropecuária do referido município. A área experimental encontrava-se em pousio há aproximadamente três anos. Previamente à instalação do experimento foi realizada a limpeza da área com o auxílio da roçadeira costal, seguida do preparo do solo com uma aração e uma gradagem (Figura 1).

Figura 1. Preparo de área e plantio de palma forrageira (*Opuntia ficus-indica*) em campo no município de Conceição do Coité-BA.



Fonte: Marcos Rodrigues, 2024

A correção do solo com calcário dolomítico e a adubação total da área (Ureia 20 kg/N/ha) foram realizadas mediante a análise prévia do solo, conforme a necessidade. A implantação do experimento foi realizada em sistema de plantio convencional, delineamento em blocos casualizados constituído de cinco tratamentos controle (sem inoculante 0); *Azospirillum brasilense* Ab-V5 (CNPSO 2083); *Rhizobium tropici* CIAT 899 (CNPSO 103); *Azospirillum brasilense* Ab-V6 (CNPSO 2084); *Bacillus subtilis* (CNPSO 2657), sob 10 avaliações (30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 330 e 450 dias após o plantio), com três repetições.

Os cladódios foram plantados em três blocos com espaçamento de 3,0 m x 2,0 m entre cada tratamento para que não houvesse interferência (transferência de bactérias) entre eles (Figura 2). Assim distribuídos de forma aleatória, compreendendo 6,0 m² cada unidade experimental.

Figura 2. Plantio de palma forrageira *Opuntia ficus-indica* em campo no município de Conceição do Coité-BA.



Autor: Marcos Rodrigues, 2024

Após o plantio das mudas e inoculação das bactérias promotoras do

crescimento de plantas foi avaliado o número de mudas que apresentaram brotação (simples ou duplas), bem como o número de brotação total por tratamento. A avaliação das mudas secundárias, foram avaliadas por meio das características morfológicas e morfogênicas, mensalmente durante o ano 1 e 2. Como características morfológicas, serão consideradas as seguintes técnicas: comprimento; largura; espessura e área das plantas. Para mensuração destas características, utilizará fita métrica e paquímetro digital.

Como características morfogênicas, foram consideradas as seguintes características: número de cladódios surgidos por planta dividido pelo número de dias do período de avaliação – cladódio/planta/dia; comprimento do cladódios, e aos 450 dias após o plantio, foram avaliadas largura do cladódios, massa fresca do cladódios e massa seca do cladódios. A taxa de crescimento absoluto (TCA) e a taxa de crescimento relativo (TCR) foram determinadas a partir do número de cladódios (NC) ao longo do tempo, de acordo com a metodologia adaptada de Peixoto et al. (2011), em que $TCA = (W2-W1)/(T2-T1) = \text{cm dia}^{-1}$ ou semana^{-1} . Onde, W1 e W2 é a variação do número de cladódios (NC) em duas amostras consecutivas tomadas nos tempos T1 e T2. Para calcular TCR, o utilizou-se a formula: $TCR = (\ln W2 - \ln W1) / (T2 - T1) = \text{cm cm}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ou semana^{-1} , onde ln é o logaritmo neperiano; W1 e W2 representam a massa da matéria seca nos tempos T1 e T2.

Para avaliação nutricional das plantas cada tratamento foi colhido, secos em estufa de circulação forçada à 45°C. As amostras foram moídas em moinho tipo Wiley, padronizado com peneira de 20 mesh, e acondicionadas em sacos plásticos. Aproximadamente em 0,1 g da massa seca dos cladódios foram submetidos à digestão ácida em uma mistura de 3,5 ml de ácido sulfúrico concentrado (H₂SO₄) e 3 ml de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) a 30%, conforme descrito em Jones (2001). O material digerido foi diluído para 100 ml com água destilada, obtendo-se assim o extrato para realização das análises de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S).

Os teores de N foram determinados pelo método espectrofotométrico do fenol-hipoclorito (WEATHERBURN, 1967), os de P pelo método espectrofotométrico do molibdo-vanadato e os de K determinados por fotometria de chama (FAITHFULL, 2002).

Os dados foram submetidos à análise de variância utilizando o software R (R

Core Team, 2025). Para a comparação entre a inoculação com os isolados bacterianos, aplicou-se o teste de Scott-Knott a 5% de significância ($p \leq 0,05$), e a análise de regressão foi empregada para avaliar o efeito ao longo dos dias. A normalidade dos resíduos foi verificada por meio do teste de Shapiro-Wilk.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos indicam que não houve interação significativa entre os fatores inoculação e tempo de avaliação para as variáveis número de cladódios (NC) e comprimento médio dos cladódios (CMC) em *Opuntia ficus-indica*, evidenciando que os efeitos da inoculação e do tempo atuaram de forma independente. No entanto, observou-se efeito significativo isolado de ambos os fatores ($p < 0,05$), o que demonstra que tanto a presença de microrganismos quanto o avanço do ciclo de cultivo influenciaram diretamente o desenvolvimento morfológico de plantas de palma forrageira (*Opuntia ficus indica*).

Com relação ao número de cladódios (NC), destaca-se o efeito da inoculação com *Bacillus subtilis*, que proporcionou a maior média (3,15 cladódios planta⁻¹), superando significativamente os demais tratamentos, que não diferiram entre si (Tabela 1). Esse resultado sugere que *B. subtilis* teve maior capacidade de estimular a emissão de novos cladódios, possivelmente por mecanismos relacionados à produção de fitormônios, como auxinas e citocininas, que estão diretamente associados à diferenciação e expansão celular, além da indução da ramificação vegetal (HASHIM et al., 2019; BLAKE et al., 2021). A atuação de *B. subtilis* também pode estar ligada à sua habilidade de melhorar a disponibilidade de nutrientes na rizosfera e induzir tolerância a estresses abióticos (MAHAPATRA et al., 2022; REN et al., 2025), o que favorece o vigor vegetativo da planta em condições de campo.

Para o comprimento dos cladódios (CC), as plantas inoculadas com *Azospirillum brasilense* Ab-V6 e Ab-V5 apresentaram as maiores médias (22,64 cm cladódio⁻¹), indicando um efeito positivo dessas estirpes na promoção do crescimento longitudinal dos cladódios. A contribuição de *A. brasilense* pode ser explicada pela fixação biológica de nitrogênio e pela síntese de fitohormônios, como o ácido indolacético (AIA), que estimulam o alongamento celular e a expansão dos tecidos

(CASSÁN et al., 2020; SANTOS et al., 2021).

Tabela 1. Número de cladódios (NC) e comprimento medio de cladódios (CMC) de plantas de *Opuntia ficus indica* inoculadas com bactérias promotoras do crescimento de plantas (*Azospirillum brasilense* Ab-V5 (CNPSO 2083); *Rhizobium tropici* CIAT 899 (CNPSO 103); *Azospirillum brasilense* Ab-V6 (CNPSO 2084); *Bacillus subtilis* (CNPSO 2657) e o controle (CT) ausente de inoculante), em condições de campo.

Isolados	NC (nº)	CMC (cm)
<i>Azospirillum brasilense</i> Ab-V5	2,45b	22,64a
<i>Azospirillum brasilense</i> Ab-V6	2,76b	18,99b
<i>Bacillus subtilis</i>	3,15a	19,68b
<i>Rhizobium tropici</i>	2,50b	20,26b
Controle	2.58b	17,03c
CV (%)	33,48	17,1

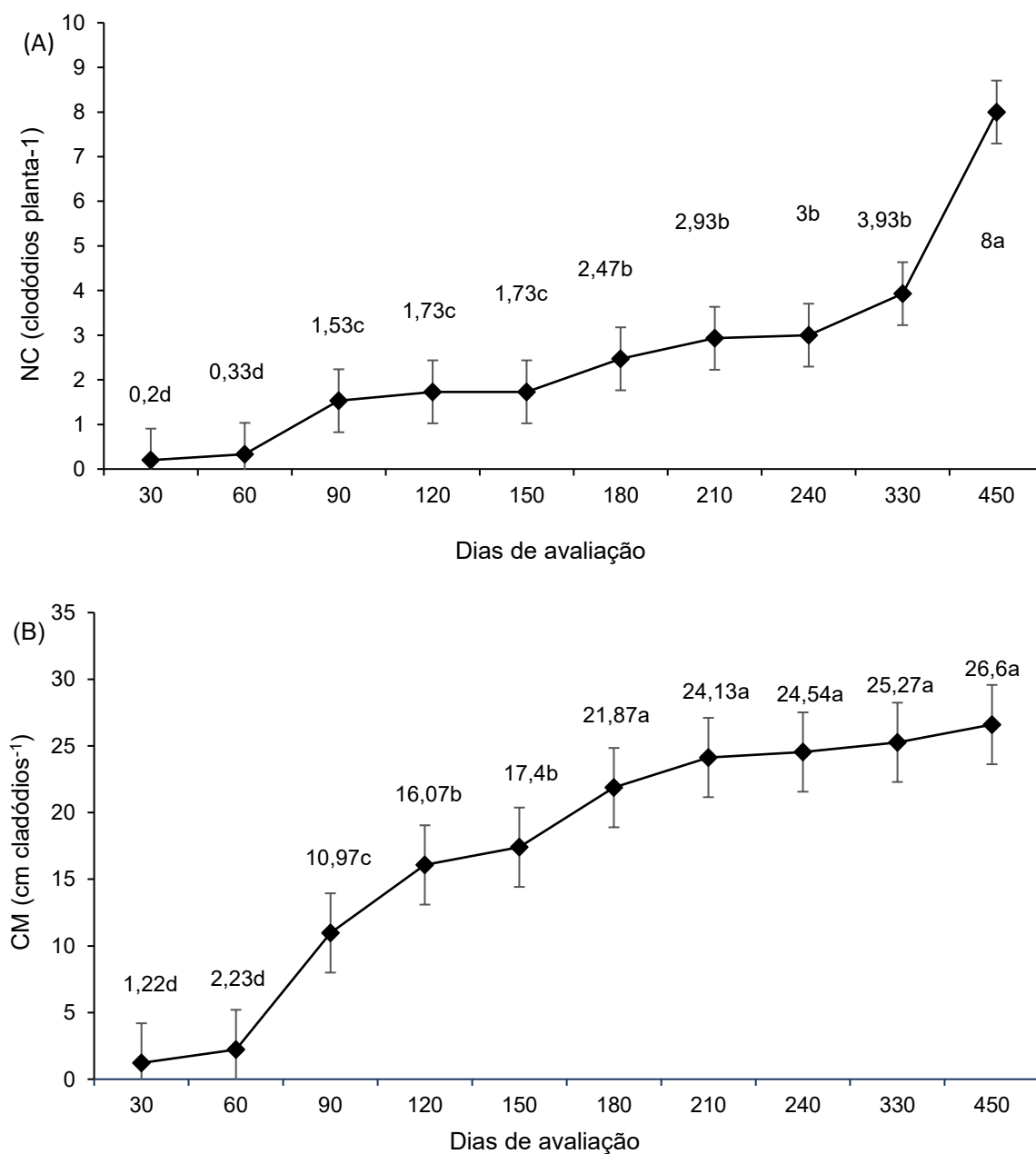
Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si de acordo com o teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

De acordo com Hungria (2011), o efeito da inoculação com *Azospirillum brasilense* está diretamente relacionado à produção de fitormônios e à fixação biológica de nitrogênio, visto que essa bactéria promotora de crescimento vegetal atua em diversos processos fisiológicos, tanto no sistema radicular quanto na parte aérea das plantas. Esses mecanismos explicam o maior comprimento dos cladódios observado nos tratamentos que receberam a inoculação com *A. brasilense*. Em contrapartida, o menor desenvolvimento foi observado no tratamento controle (17,03 cm cladódio⁻¹), o que evidencia o papel benéfico das BPCPs na morfogênese da palma forrageira, especialmente em ambientes de campo, nos quais a disponibilidade de nutrientes e água pode ser limitada.

Diferentes microrganismos podem atuar de forma diferenciada nos parâmetros morfológicos da planta, reforçando a importância da escolha de estirpes eficientes e adaptadas à cultura e às condições edafoclimáticas locais (BANERJEE et al., 2022). O uso de inoculantes biológicos representa, portanto, uma alternativa sustentável para intensificar a produção de biomassa da palma forrageira, contribuindo para o fortalecimento da agricultura em regiões semiáridas.

Em relação a variável o número de cladódios por planta (NC) e o comprimento médio dos cladódios (CMC) de *Opuntia ficus-indica*, houve um aumento significativo ao longo do período avaliado (30 a 450 dias após o plantio), demonstrando um padrão de crescimento contínuo sob condições de campo (Figura 3).

Figura 3. Número de cladódios (NC) (A), comprimento médio do cladódios (CMC) (B) de plantas *Opuntia ficus indica* sobre diferentes dias de avaliação em condições de campo.



Aos 30 dias de avaliação, a média de NC foi de 0,2 cladódio por planta, atingindo 8 cladódios aos 450 dias (Figura 3A). Considerando que o valor inicial representa apenas 2,5%, o que indica um aumento percentual de 97,5% no número de cladódios ao longo do experimento. Esse comportamento evidencia um crescimento vegetativo sustentado, com emissão progressiva de novos cladódios. A

partir dos 330 dias, a planta intensificou esse processo, resultando em diferença estatística significativa aos 450 dias. Esse padrão pode estar relacionado à maturação fisiológica da planta, ao acúmulo de reservas e à maior disponibilidade de assimilados para o desenvolvimento de estruturas vegetativas (ZHAO, 2024; ALVES et al., 2025). A maior emissão de cladódios em estágios mais avançados reforça o potencial da espécie para produção contínua de biomassa, sendo um indicativo relevante para seu uso em sistemas de produção animal e vegetal em ambientes semiáridos (CIRINO JUNIOR et al., 2022).

Quanto ao comprimento médio dos cladódios (CMC), também se verificou um incremento expressivo ao longo do tempo, passando de 1,22 cm aos 30 dias para 26,6 cm aos 450 dias (Figura 3 B). Considerando esses valores, houve um aumento percentual de aproximadamente 95,4%. Os dados apontam para um crescimento contínuo e acumulativo, com diferença estatística significativa até os 210 dias, a partir dos quais os valores se estabilizaram. Essa estabilização pode refletir uma limitação fisiológica imposta pela arquitetura da planta, priorização metabólica para emissão de novos cladódios, ou ainda adaptação morfológica frente às condições ambientais. Apesar disso, o acúmulo de biomassa permaneceu evidente, reforçando a capacidade da *Opuntia ficus-indica* de converter recursos hídricos e nutrientes de forma eficiente ao longo do tempo. Esse comportamento é consistente com as características ecofisiológicas da espécie, incluindo o metabolismo fotossintético CAM, que favorece o crescimento sob estresse hídrico (WU et al., 2024). Portanto, tanto a emissão quanto o alongamento dos cladódios refletem a elevada plasticidade da espécie e seu potencial como cultura perene para regiões com limitações hídricas.

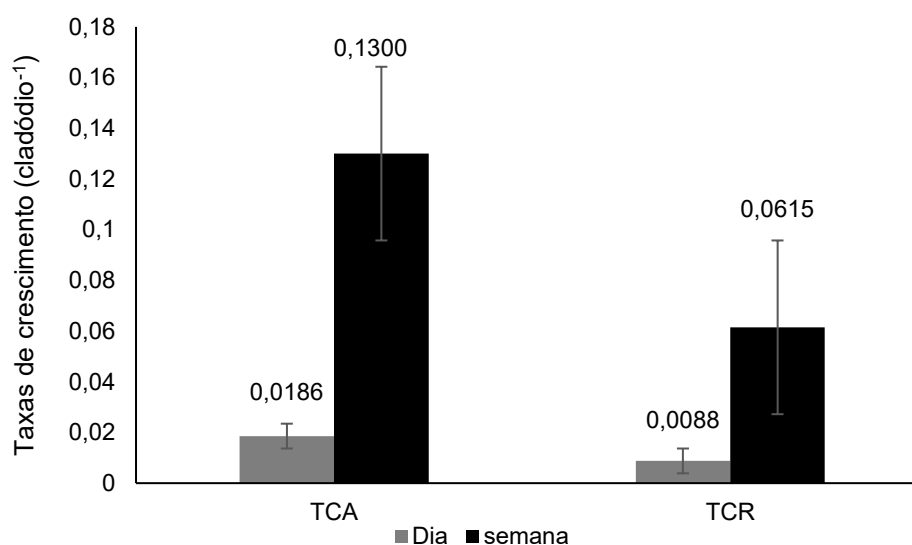
Apesar das adaptações fenológicas, fisiológicas e estruturais que conferem às cactáceas uma elevada tolerância à seca, a baixa disponibilidade hídrica e a ocorrência de solos empobrecidos ainda representam limitações significativas ao seu pleno desenvolvimento. Nesse contexto, a adoção de práticas de manejo adequadas torna-se essencial para otimizar a produção da palma forrageira. A inoculação com bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP) surge como uma estratégia promissora, por contribuir para a melhoria da nutrição vegetal, o aumento da eficiência fotossintética, o estímulo ao crescimento e, conseqüentemente, a elevação da produtividade da cultura (LYRA et al., 2016; BARBOSA et al., 2022; LIU et al., 2022; LIU et al., 2024), mesmo em condições adversas de clima e solo.

Para as variáveis largura do cladódios (LC), massa fresca das folhas (MFC) e massa seca das folhas (MSC) da palma forrageira, avaliadas aos 450 dias após o plantio, não foram observadas diferenças significativas em função da inoculação com os isolados bacterianos. A ausência de diferenças significativas nas variáveis largura dos cladódios (LC), massa fresca das folhas (MFC) e massa seca das folhas (MSC) aos 450 dias após o plantio pode estar relacionada à menor sensibilidade desses atributos às alterações promovidas pela inoculação bacteriana. É possível que essas variáveis estejam mais fortemente condicionadas a aspectos ambientais, como disponibilidade hídrica e radiação solar, do que à ação direta dos microrganismos inoculados. Além disso, os efeitos benéficos da inoculação podem ter se concentrado em outros parâmetros de crescimento, como número ou comprimento de cladódios, sem impactar significativamente a biomassa foliar ou a expansão lateral dos cladódios, conforme observado na Tabela 1.

Para a taxa de crescimento absoluto (TCA), os maiores incrementos absolutos ocorreram entre 60–90 dias e 330–450 dias, houve estabilização entre 120–150 dias, com média de 0,0186 cladódios dia⁻¹ e 0,1300 cladódios semana⁻¹, mostrando que o ganho absoluto de cladódios cresce quando a planta já dispõe de área fotossintética e reservas acumuladas (Figura 4). Na taxa de crescimento relativo (TCR), o crescimento relativo mais intenso ocorreu em 60–90 dias, há um estabelecimento 120–150 dias com 0,0179 cladódios dia⁻¹ e 0,1259 cladódios semana⁻¹ e uma nova aceleração relativa no final (330–450 dias), porém menor que a fase inicial com médias de 0,0088 cladódios dia⁻¹ e 0,0615 cladódios semana⁻¹.

O intervalo 120–150 dias em TCA e TCR caracteriza um estabelecimento, compatível com transição ontogenética e/ou limitações temporárias (água, nutrientes ou clima), após o qual a expansão da copa retoma (Figura 4). A espécie alterna fases de estabelecimento, estabilização e novo impulso de crescimento, com o componente absoluto aumentando à medida que a planta cresce e o relativo declinando por efeito de escala. Ou seja, o absoluto pode subir em fases tardias (mais tecido produzindo), mas o relativo cai à medida que a planta cresce e se aproxima de limites fisiológicos/ambientais. O crescimento vegetal resulta da produção de assimilados suficientes para, ao mesmo tempo, suprir as necessidades metabólicas do tecido já existente e construir ou armazenar novo material estrutural (BENINCASA, 2004).

Figura 4. Taxas do crescimento absoluto (TCA) e relativo (TCR) a partir do número de cladódios de plantas *Opuntia ficus indica* ao longo do tempo (30 – 450 dias), descrita em dias⁻¹ e semana⁻¹ em condições de campo.



Em relação os teores nutricionais, os resultados obtidos demonstram que a utilização de bactérias promotoras do crescimento de plantas (BPCPs) teve efeito positivo no desenvolvimento e produtividade da palma forrageira gigante (*Opuntia ficus-indica*), refletido no aumento significativo dos teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S), micronutrientes (Fe, Cu, Mn, Zn e B), além de elementos como sódio (Na) e silício (Si), e no acúmulo de matéria seca (Tabela 2). Esses incrementos indicam que a inoculação favoreceu a absorção e assimilação de nutrientes essenciais, potencializando os processos fisiológicos responsáveis pela síntese de biomassa e crescimento vegetal (SÁ et al., 2019; AZIZ et al., 2022).

As estirpes *Azospirillum brasilense* Ab-V5 e Ab-V6, *Rhizobium tropici* e *Bacillus subtilis* se destacaram por promover os maiores acréscimos nos índices nutricionais e produtivos da cultura (Tabela 2). Esses microrganismos são reconhecidos por atuarem em múltiplos mecanismos benéficos, incluindo a fixação biológica de nitrogênio, a solubilização de fosfatos e potássio, a produção de fitormônios (como auxinas e giberelinas), além da indução de tolerância a estresses abióticos, como seca e salinidade, condições frequentemente enfrentadas por culturas em ambientes semiáridos (HUNGRIA et al., 2015; GUIMARÃES et al., 2017; SANTOS et al., 2021).

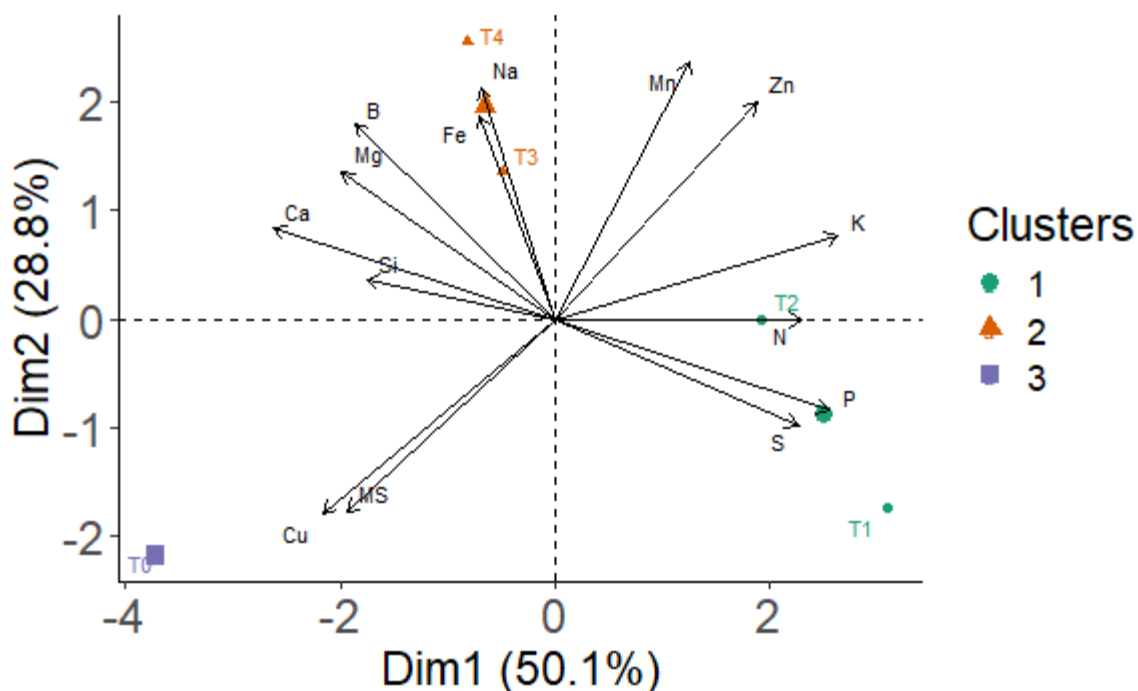
Tabela 2. Teores nutricionais de palma forrageira após inoculação com bactérias promotoras de crescimento de plantas (0-controle; 103- *Rhizobium tropici*; 2083-

Azospirillum brasiliense Ab-V5; 2084- *Azospirillum brasiliense* Ab-V6; 2657- *Bacillus subtilis*) cultivados em campo.

MACRONUTRIENTES					
Elemento/teor	0	103	2083	2084	2657
Matéria Seca (%)	6,9	5,5	4,4	5,4	4,9
Nitrogênio (g/kg)	14,8	24,1	19	16,1	20,4
Fósforo (g/kg)	1,1	2,1	1,6	1,5	1,2
Potássio (g/kg)	10,3	19,5	21,2	16,3	16,9
Cálcio (g/kg)	56,5	38,7	44,4	48,7	55,5
Magnésio (g/kg)	17,3	14,7	16,1	15,9	18,4
Enxofre (g/kg)	1,7	3,2	2,1	2,2	1,8
MICRONUTRIENTES					
Elemento/teor	0	103	2083	2084	2657
Ferro (mg/kg)	43,0	43,7	39,3	44,5	54,6
Cobre (mg/kg)	4,3	5,8	4,5	4,3	4,3
Manganês (mg/kg)	350,4	462,2	613,6	579,1	604,1
Zinco (mg/kg)	33,3	41,2	43	43,9	42,6
Boro (mg/kg)	52,3	45,5	49,3	56,8	54,0
Molibidênio (mg/kg)	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
ELEMENTOS BENÉFICOS					
Elemento/teor	0	103	2083	2084	2657
Sódio (mg/kg)	45,2	47,8	37,7	68,2	67,8
Silício (mg/kg)	210,0	153,3	141,9	249,6	168,9

A PCA explicou 78,9% da variância (PC1 = 50,1%; PC2 = 28,8%) (Figura 5). No PC1, o semieixo positivo agrupa K–N–P–S (com Zn–Mn na mesma direção) e o negativo reúne Cu e MS/LMS, além de Ca–Si e do bloco Na–Fe–B–Mg. O PC2 contrapõe Na–Fe–B–Mg (com Zn–Mn no quadrante superior direito) a P–S e Cu–MS/LMS no inferior. As correlações seguem os ângulos, K–N–P–S que são coassociados, Zn–Mn fortemente correlatos, Na–Fe–B–Mg co-correlacionados e negativamente ligados a P–S, Ca–Si alinhados e Cu com MS/LMS, opostos aos macronutrientes. No espaço das amostras, T1 (*R. tropici*) e T2 (Ab-V5) (cluster 1) situam-se à direita (*R. tropici*- T1 próximo a P–S e T2 a K–N), T3 (Ab-V6) e T4 (*B. subtilis*) (cluster 2) ficam no superior esquerdo (Na–Fe–B–Mg), o cluster 3 concentra-se no inferior esquerdo (Cu–MS/LMS).

Figura 5. Gráfico com as setas representando as contribuições de cada variável na análise de Análise de Componentes Principais (ACP).



O cluster 1 exibe o perfil nutricional mais favorável (enriquecimento conjunto em K–N–P–S), o cluster 2 sugere condição potencialmente estressante (assinatura Na–Fe–B–Mg e antagonismo a P–S) e o cluster 3 indica ganhos de biomassa pouco acompanhados por macronutrientes (Figura 5). É importante manejar para aproximar os tratamentos do polo K–N–P–S, com controle de Na/Fe e ajustes moderados com Ca–Si, tende a otimizar o balanço nutricional sem deslocar o sistema para um perfil salino.

A melhoria do perfil nutricional e o maior acúmulo de matéria seca observados nos tratamentos inoculados não apenas refletem maior eficiência fisiológica das plantas, mas também indicam o potencial dos inoculantes biológicos como uma alternativa viável para reduzir a dependência de fertilizantes minerais, o que implica diretamente na diminuição dos custos de produção (ELNAHAL et al., 2022; SAMANTARAY et al., 2024). Assim, a adoção de BPCPs em sistemas de cultivo da palma forrageira gigante pode ser considerada uma estratégia sustentável e economicamente vantajosa, promovendo maior retorno produtivo e financeiro ao agricultor, além de contribuir para a resiliência dos sistemas agrícolas frente às mudanças climáticas.

4. CONCLUSÕES

A inoculação com bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCPs) influenciou positivamente o desenvolvimento da palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill.) cultivar Gigante em condições de sequeiro.

Houve aumento significativo no número e comprimento dos cladódios ao longo dos 450 dias de avaliação, com destaque para os tratamentos com *Bacillus subtilis* e *Azospirillum brasilense* (Ab-V5 e Ab-V6), que promoveram maior brotação e crescimento longitudinal, respectivamente.

A inoculação apresentou maior acúmulo de matéria seca e incremento nos teores de macro e micronutrientes, a partir da análise nutricional, evidenciando maior eficiência na absorção e assimilação de nutrientes.

O uso de BPCPs é uma estratégia eficaz e sustentável para melhorar o desempenho produtivo e nutricional da palma forrageira em regiões semiáridas.

5. REFERENCIA

ALVES, C. P.; DA SILVA, T. G. F.; ARAÚJO JÚNIOR, G. D. N.; DE SOUZA, L. S. B.; JARDIM, A. M. D. R. F.; DE ARAÚJO, G. G. L.; QUEIROZ, M. A. A.; SILVA, S. M. S.; PINHEIRO, A. G.; SALVADOR, K. R. S.; SALVADOR, K. R. D. S. Morphophysiological indicators, phenophase and cutting time in an irrigated forage cactus–sorghum intercropping system under strategies of agricultural resilience and agriculture biosaline. **Irrigation and Drainage**, v. 74, n. 1, p. 251-275, 2025.

ARAÚJO, T. P.M.; LIMA JÚNIOR, D. M.; SILVA, E. C. L.; NEVES, M. L. M. W.; SANTOS, K. C.; FERREIRA, M. A.; MONNERAT, J. P. I.; ALVES, S. P. A.; BESSA, R. J. B.; CARVALHO, F. F. R. Effect of cactus species in the diet of dairy goats on feed efficiency, milk production and composition of milk and cheese. **Animal Feed Science and Technology**, v. 304, p. 115755, 2023.

ARAÚJO, F. F.; FARIAS, D. P.; NERI-NUMA, I. A.; PASTORE, G. M. Underutilized plants from the Cactaceae family: nutritional aspects and technological applications. **Elsevier**, v. 362, p. 130196, 2021.

AZIZ, M. A. A.; OTHMAN, N. M. I.; KAMARUZAMAN, N. B. A Review on Bacteria, Fungi and Dual Inoculation Towards Nitrogen Fixation in **Oil Palm Plants**. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2022. p. 012030.

BARBOSA, J. Z.; ROBERTO, L. A.; HUNGRIA, M.; CORRÊA, R. S.; MAGRI, E.; CORREIA, T. D. Meta-analysis of maize responses to *Azospirillum brasilense*

inoculation in Brazil: Benefits and lessons to improve inoculation efficiency. **Applied Soil Ecology**, v. 170, p. 104276, 2022.

BANERJEE, S.; BANERJEE, A.; PALIT, D. Morphological and biochemical study of plant species-a quick tool for assessing the impact of air pollution. **Journal of Cleaner Production**, v. 339, p. 130647, 2022.

BELHADJ S. I.; NAJAR, T.; ABDERRABBA, M. Bioactive compounds of prickly pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.]. **Bioactive Compounds in Underutilized Vegetables and Legumes**, 1-40. 2020.

BENICASA, M. M. P. **Análise de Crescimento de Plantas (noções básicas)**. Jaboticabal. FUNEP, 2004. 42p.

BLAKE, C.; CHRISTENSEN, M. N.; KOVÁCS, Á. T. Molecular aspects of plant growth promotion and protection by *Bacillus subtilis*. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, v. 34, n. 1, p. 15-25, 2021.

CASSÁN, F.; CONIGLIO, A.; LÓPEZ, G.; MOLINA, R.; NIEVAS, S.; DE CARLAN, C. L. N.; DONADIO, F.; TORRES, D.; ROSAS, S.; PEDROSA, F. O.; SOUSA E.; ZORITA, M. D.; DE-BASHAN, L. MORA, V. Everything you must know about *Azospirillum* and its impact on agriculture and beyond. **Biology and Fertility of Soils**, v. 56, p. 461-479, 2020.

CIRINO JUNIOR, B.; LEITE, M. L. M. V.; SILVA, F. E.; ALVES, C. P.; OLIVEIRA, A. C.; EUGÊNIO, D. S. Initial growth of forage cactus clones at different potassium fertilization levels. **Ciência Animal Brasileira**, v. 23, p. e-70836E, 2022.

DUBEUX JR, J. C. B., DOS SANTOS, M. V. F., DA CUNHA, M. V., DOS SANTOS, D. C., DE ALMEIDA SOUZA, R. T., DE MELLO, A. C. L., & DE SOUZA, T. C. Cactus (*Opuntia and Nopalea*) nutritive value: A review. **Animal Feed Science and Technology**, 275, 114890. 2021.

ELNAHAL, A. S.; EL-SAADONY, M. T.; SAAD, A. M.; DESOKY, E. S. M.; EL-TAHAN, A. M.; RADY, M. M.; ABUQAMAR, S. F.; EL-TARABILY, K. A. The use of microbial inoculants for biological control, plant growth promotion, and sustainable agriculture: A review. **European Journal of Plant Pathology**, v. 162, n. 4, p. 759-792, 2022.

FUKAMI, J.; OLLERO, F. J.; MEGIAS, M.; HUNGRIA, M. Phytohormones and induction of plant-stress tolerance and defense genes by seed and foliar inoculation with *Azospirillum brasilense* cells and metabolites promote maize growth. **AMB Expr** v. 7, p. 153, 2017.

GUIMARÃES, V. F.; BATTISTUS, A. G.; SOUZA, A. D.; BULEGON, L. G.; OFFEMANN, L. C.; INAGAKI, A. M. Bactérias Promotoras de Crescimento Vegetal: da FBN à regulação hormonal, possibilitando novas aplicações. **ZAMBOM, MA; KUHN, OJ; SILVA, NLS Da; STANGARLIN, JR**, 193-212. 2017.

HASHEM, A.; TABASSUM, B.; ABD_ALLAH, E. F. *Bacillus subtilis*: A plant-growth

promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress. **Saudi Journal of biological sciences**, v. 26, n. 6, p. 1291-1297, 2019.

HAKIM, S.; NAZIR, R.; AHMAD, M.; IQBAL, A.; MAHMOOD, S. Illumina sequencing of 16S rRNA tag shows disparity in rhizobial and non-rhizobial diversity associated with root nodules of mung bean (*Vigna radiata* L.) growing in different habitats in Pakistan. **Microbiological Research**, v. 231, p. 126356, 2020.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Soybean Seed Co-Inoculation with *Bradyrhizobium* spp. and *Azospirillum brasilense*: A New Biotechnological Tool to Improve Yield and Sustainability. **American Journal of Plant Sciences**, v. 6, p. 811-817, 2015.

HUNGRIA, M. **Inoculação com *Azospirillum brasilense*: inovação em rendimento a baixo custo**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 36 p. (Documentos, n. 325).

LOPES, M.J.S.; SANTIAGO, B.S.; SILVA, I.N.B.; GURGEL, E.S.C. Microbial biotechnology: inoculation, mechanisms of action and benefits to plants. **Research, Society and Development**, [S. l.], v.10, n.12, p.e356101220585, 2021

LIU, Y.; ZHANG, H.; HAN, H.; LI, Y.; CHEN, Z. Plant growth-promoting bacteria improve the Cd phytoremediation efficiency of soils contaminated with PE–Cd complex pollution by influencing the rhizosphere microbiome of sorghum. **Journal of Hazardous Materials**, v. 469, p. 134085, 2024.

LI, X.; LIU, Y.; LI, Y.; HAN, H.; ZHANG, H.; JI, M.; CHEN, Z. Enhancing mechanisms of the plant growth-promoting bacterial strain *Brevibacillus* sp. SR-9 on cadmium enrichment in sweet sorghum by metagenomic and transcriptomic analysis. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 23, p. 16309, 2022. <https://doi.org/10.3390/ijerph192316309>

LYRA, M. C. C. P.; PÉREZ-MONTAÑO, F.; JIMÉNEZ-GUERRERO, I.; MADINABEITIA, N.; DIAZ-OLIVARES, I. M.; GUTIÉRREZ-ALCÁNTARA, R.; OLLERO, F. J. SESSION IV SIV-CP-17 Efeito de bactérias PRPG com indução de ácido salicílico em plântulas de duas cultivares de palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*). In **II IBEROAMERICAN CONFERENCE ON BENEFICIAL PLANT-MICROORGANISM-ENVIRONMENT INTERACTIONS (IBEMPA)** (p. 309). 2016.

MACÊDO, A. J. S.; NETO, J. M. C.; DE OLIVEIRA, L. B.; EDVAN, R. L.; SANTOS, E. M. A cultura da palma, origem, introdução, expansão, utilidades e perspectivas futuras: Revisão de Literatura. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 62967-62987, 2022.

MAHAPATRA, S.; YADAV, R.; RAMAKRISHNA, W. *Bacillus subtilis* impact on plant growth, soil health and environment: Dr. Jekyll and Mr. Hyde. **Journal of applied microbiology**, v. 132, n. 5, p. 3543-3562, 2022.

OLANREWaju, O.S.; GLICK, B.R.; BABALOLA, O.O. Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v.33, n.11, p.197, 2017.

ORTIZ-RODRIGUEZ, R.; GALVAN-AGUILAR, M.; LÓPEZ-RODRIGUEZ, M.; SÁNCHEZ, R. E. P.; LUNA-CRUZ, A.; ORDAZ-OCHO, G. Efeito da biofertilização de hortaliças de nopal (*Opuntia ficus-indica*) sobre variáveis físico-químicas, fitoquímicas e morfológicas e sua relação com a produção de biomassa. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v. 28, n. 1, 2025.

PEIXOTO, C. P.; CRUZ, T. V.; PEIXETO, M. F. S. P. Análise quantitativa do crescimento de plantas: Conceitos e Prática. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v. 7, n.13, 2011.

QUEIROGA, V. P.; LOPES, B. E.; GIRÃO, E. G.; NETO, A. F.; ALBUQUERQUE, E. M. B. Palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill): Tecnologias de plantio e utilização. led. – Campina Grande: **AREPB**, 224 f.: il. color. ISBN 978-85-67494-35-7. 2020.

REN, P.; ZHOU, B.; BI, Y.; CHEN, X.; YAO, S. YANG, X. *Bacillus subtilis* can promote cotton phenotype, yield, nutrient uptake and water use efficiency under drought stress by optimizing rhizosphere microbial community in arid area. **Industrial Crops and Products**, v. 227, p. 120784, 2025.

SÁ, G. C.; HUNGRIA, M.; CARVALHO, C. L. M.; MOREIRA, A.; NOGUEIRA, M.; HEINRICHS, R.; SOARES FILHO, C. V. Nutrients uptake in shoots and biomass yields and roots and nutritive value of zuri Guinea grass inoculated with plant growth-promoting bacteria. **Commun Soil Sci Plant Anal**, v. 50, n. 22, p. 2927-2940, 2019.

SAMANTARAY, A.; CHATTARAJ, S.; MITRA, D.; GANGULY, A.; KUMAR, R.; GAUR, A.; MOHAPATRA, P. K.; SANTOS-VILLALOBOS, S.; RANI, A.; THATOI, H. Advances in microbial based bio-inoculum for amelioration of soil health and sustainable crop production. **Current Research in Microbial Sciences**, 100251, 2024.

SANTOS, S. A.; SANTANA, H. E. P.; JESUS, M. S.; TORQUATO, I. A.; SANTOS, J.; PIRES, P.; RUZENE, D. S.; SILVA, D. P. Progress and Trends in Forage Cactus Silage Research: A Bibliometric Perspective. **Fermentation**, v. 10, n. 10, p. 531, 2024.

SANTOS, M. A.; DOS SANTOS, B. R. C. Silagem da palma forrageira consorciada com resíduos da mandioca e bagaço da cana-de-açúcar: Revisão. **Pubvet**, v. 12, p. 133, 2018.

SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Outstanding impact of *Azospirillum brasilense* strains Ab-V5 and Ab-V6 on the Brazilian agriculture: Lessons that farmers are receptive to adopt new microbial inoculants. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, p. e0200128, 2021.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; LIMA, H. N.; MARQUES, F. A.; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 6. ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2025. 393 p. ISBN 978-65-5467-104-0.

SILVA, R.; SANTOS, C. E. R.; MELO, C. S.; PEREIRA, M. G.; BALDANI, J. I. Gluconacetobacter diazotrophicus changes the molecular mechanisms of root development in *Oryza sativa* L. growing under water stress. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 1, p. 333, 2020.

SLOT, L. E.; FATILHA, F.; Drivers of Adoption of Sustainable Prickly Pear (*Opuntia ficus-indica*) Innovations and Conservation Agriculture by Smallholder Farmers in Morocco. **Agronomy**, v. 14, n.12, p. 3014, 2024.

WU, B.; SMITH, W. K.; ZENG, H. (2024). Dryland Dynamics and Driving Forces. **In Dryland Social-Ecological Systems in Changing Environments**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024, p. 23-68.

ZHAO, G. Plant compensatory growth: its mechanisms and implications to agricultural sustainability under global environmental changes. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 31, n. 3, p. 348-360, 2024.