



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

DANILO BATISTA NOGUEIRA

**ESTRATÉGIAS DE INOCULAÇÃO E COINOCULAÇÃO DE BIOINSUMOS E
ADUBAÇÃO NITROGENADA PARA MITIGAÇÃO DO ESTRESSE HÍDRICO NA
CULTURA DO MILHO EM REGIÃO SEMIÁRIDA**

**FORTALEZA
2025**

DANILO BATISTA NOGUEIRA

ESTRATÉGIAS DE INOCULAÇÃO E COINOCULAÇÃO DE BIOINSUMOS E
ADUBAÇÃO NITROGENADA PARA MITIGAÇÃO DO ESTRESSE HÍDRICO NA
CULTURA DO MILHO EM REGIÃO SEMIÁRIDA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Orientador: Prof. Dr. Alexsandro Oliveira da Silva.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N711e Nogueira, Danilo Batista.

Estratégias de inoculação e coinodulação de bioinsumos e adubação nitrogenada para mitigação do estresse hídrico na cultura do milho em região semiárida / Danilo Batista Nogueira. – 2025.

85 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Alexsandro Oliveira da Silva.

1. Déficit hídrico. 2. Zea mays. 3. Bacillus aryabhattai. 4. Azospirillum brasiliense. 5. Produtividade. I. Título.

CDD 630

DANILO BATISTA NOGUEIRA

ESTRATÉGIAS DE INOCULAÇÃO E COINOCULAÇÃO DE BIOINSUMOS E
ADUBAÇÃO NITROGENADA PARA MITIGAÇÃO DO ESTRESSE HÍDRICO NA
CULTURA DO MILHO EM REGIÃO SEMIÁRIDA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Aprovada em: 30 / 04 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Oliveira da Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Raimundo Nonato Távora Costa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Fernando Ferrari Putti
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Prof. Dr. Gustavo Ferreira da Silva
Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR)

Prof. Dr. Geocleber Gomes de Sousa
Universidade da Integração Internacional Lusofonia Afro-Brasileira (Unilab)

A Deus.

A minha querida esposa Amanda e meus
amados filhos Álvaro e Olívia.

Aos meus pais Lucides e Antônia Gorete.

A minha irmã Denise.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Ceará pela oportunidade e estrutura para conduzir o estudo e possibilitar a obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola.

Ao Prof. Dr. Alexsandro Oliveira da Silva, pela excelente orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dr. Raimundo Nonato, Prof. Dr. Fernando Ferrari, Prof. Dr. Gustavo Ferreira e Prof. Dr. Geocleber Gomes de Sousa pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos colegas de turma no curso de doutorado, pela amizade, pelos momentos de descontração, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

Aos colegas da turma de Agronomia, mais especificamente do complexo 222/221, pela amizade, pelos momentos de descontração e pelo crescimento pessoal e profissional que me proporcionaram.

“Compreender que há outros pontos de vista é o início da sabedoria.” (THOMAS CAMPBELL).

RESUMO

O déficit hídrico, especialmente em regiões áridas e semiáridas, é um dos principais fatores limitantes na cultura do milho. Bioinsumos, como bactérias promotoras de crescimento, representam alternativas promissoras para melhorar a resiliência das plantas ao estresse hídrico, promovendo maior crescimento radicular e produção de fitormônios, como o ácido abscísico, que regula o fechamento estomático e reduz a perda de água. Objetivou-se avaliar os efeitos da inoculação e coinoculação com *Bacillus aryabhattai* e *Azospirillum brasiliense* sobre o desempenho agronômico e fisiológico da cultura do milho sob condições de déficit hídrico em diferentes fases fenológicas, além de estimar o coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (Ky) e a viabilidade econômico-social dos sistemas de produção estudados. O estudo foi conduzido em dois ciclos (2023 e 2024), em condições de campo, sob delineamento em blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. As parcelas foram compostas por cinco estratégias de irrigação: irrigação plena (IP), déficit regular (IDR50%), déficit controlado nas fases vegetativa (IDCV50%), de florescimento e formação de grãos (IDCF50%) e de enchimento de grãos (IDCE50%). As subparcelas receberam quatro manejos de bioinsumos aplicados via tratamento de sementes: A (inoculação com *B. aryabhattai*), V (coinoculação com *B. aryabhattai* + *A. brasiliense*), P (controle positivo, sem bioinsumo, mas com adubação nitrogenada) e B (controle negativo, sem uso de nitrogênio mineral ou bioinsumo). Avaliaram-se variáveis agronômicas, fisiológicas (fotossíntese-A, transpiração-E, condutância estomática-gs, Concentração interna de CO₂-Ci, A/Ci e Índice SPAD), eficiência do uso da água, Ky e indicadores econômicos, incluindo renda agrícola líquida e área mínima necessária para assegurar a reprodução social da unidade produtiva. Os resultados indicaram que a inoculação dos bioinsumos promoveu efeitos fisiológicos pontuais sob déficit hídrico, mas sem expressividade estatística em grande parte dos tratamentos, especialmente no segundo ciclo. Por outro lado, a irrigação com déficit controlado na fase vegetativa (IDCV50%) demonstrou ser a estratégia mais eficiente, combinando menores valores de Ky (<1), manutenção da produtividade e maior viabilidade econômica. Os tratamentos com irrigação plena e coinoculação também apresentaram retorno econômico superior, com destaque para a redução da área mínima necessária por trabalhador rural, reforçando o potencial dessas práticas para a agricultura familiar. A análise do coeficiente Ky confirmou maior sensibilidade da cultura nas fases de florescimento e enchimento de grãos, enquanto o déficit hídrico em fase vegetativa foi melhor tolerado. Conclui-se que a adoção de estratégias de irrigação deficitária controlada em fases menos

sensíveis, associada ou não ao uso de bioinsumos, pode representar uma alternativa viável para otimizar o uso da água, reduzir custos de produção e garantir sustentabilidade agronômica e socioeconômica do cultivo do milho em regiões semiáridas.

Palavras-chave: Déficit hídrico; *Zea mays* L.; *Bacillus aryabhattachai*; *Azospirillum brasiliense*; Produtividade.

ABSTRACT

Water deficit, especially in arid and semi-arid regions, is one of the main limiting factors in maize cultivation. Bioinputs, such as plant growth-promoting bacteria, represent promising alternatives to enhance plant resilience under water stress by stimulating root growth and the production of phytohormones, such as abscisic acid, which regulates stomatal closure and reduces water loss. This study aimed to evaluate the effects of inoculation and co-inoculation with *Bacillus aryabhattachai* and *Azospirillum brasiliense* on the agronomic and physiological performance of maize under water deficit conditions at different phenological stages, as well as to estimate the crop sensitivity coefficient to water deficit (K_y) and assess the economic and social viability of the production systems employed. The experiment was conducted under field conditions during two cropping seasons (2023 and 2024), using a randomized block design in a split-plot arrangement with four replications. The main plots consisted of five irrigation strategies: full irrigation (IP), regular deficit (IDR50%), and controlled deficits during the vegetative stage (IDCV50%), flowering and grain formation stage (IDCF50%), and grain filling stage (IDCE50%). The subplots comprised four bioinput managements applied via seed treatment: A (inoculation with *B. aryabhattachai*), V (co-inoculation with *B. aryabhattachai* + *A. brasiliense*), P (positive control, without bioinputs but with mineral nitrogen fertilization), and B (negative control, without mineral nitrogen or bioinputs). The variables evaluated included agronomic parameters, physiological attributes (photosynthetic rate - A, transpiration rate - E, stomatal conductance - gs, internal CO₂ concentration - Ci, carboxylation efficiency - A/Ci, and chlorophyll content - SPAD index) as well as water use efficiency, K_y , and economic indicators including net farm income and the minimum land area required to ensure the social reproduction of the production unit. The results indicated that the use of bioinputs had limited physiological effects under water deficit, with no statistically significant impacts in most treatments, particularly in the second season. In contrast, controlled deficit irrigation during the vegetative stage (IDCV50%) proved to be the most efficient strategy, combining lower K_y values (<1), stable yield levels, and greater economic feasibility. Treatments involving full irrigation and co-inoculation also showed higher economic returns, notably through a reduction in the minimum land area needed per rural worker, highlighting the potential of such practices for family farming systems. The K_y analysis confirmed greater crop sensitivity to water stress during the flowering and grain filling stages, while vegetative-stage deficit was better tolerated. It is concluded that adopting controlled deficit irrigation strategies during less sensitive growth stages, with or without the use of bioinputs, can

represent a viable alternative for optimizing water use, reducing production costs, and ensuring the agronomic and socio-economic sustainability of maize cultivation in semi-arid regions.

Keywords: Water deficit; *Zea mays* L.; *Bacillus aryabhatti*; *Azospirillum brasilense*; Productivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área estudos na Fazenda Experimental Vale do Curu, Pentecoste, Ceará	29
Figura 2 – Evapotranspiração de referência (ETo) e evapotranspiração da cultura (ETc) (A), temperatura do ar (B) e umidade relativa do ar (C), durante o primeiro ciclo de cultivo do experimento (07 de agosto a 19 de novembro de 2023)	31
Figura 3 – Evapotranspiração de referência (ETo) e evapotranspiração da cultura (ETc) (A), temperatura do ar (B) e umidade relativa do ar (C), durante o segundo ciclo de cultivo do experimento (19 de setembro a 27 de dezembro de 2024)	32
Figura 4 – Lâminas acumuladas nas diferentes estratégias de irrigação estudadas no primeiro (2023) e segundo ciclos (2024)	37
Figura 5 – Massa fresca da espiga sem palha na cultura do milho sob diferentes estratégias de irrigação e bioinsumos promotores de crescimento	44
Figura 6 – Diâmetro da espiga de milho sob diferentes estratégias de irrigação no segundo ciclo (2024)	46
Figura 7 – Número de grãos por fileira (NGF) na cultura do milho sob diferentes estratégias de irrigação no segundo ciclo (2024)	47
Figura 8 – Massa fresca da espiga com palha (A) e sem palha (B) de milho sob diferentes estratégias de irrigação no segundo ciclo (2024)	48
Figura 9 – Produção por planta (A) e produtividade (B) de milho sob diferentes estratégias de irrigação no primeiro ciclo (2023)	50
Figura 10 – Produção por planta (A) e produtividade (B) de milho sob diferentes estratégias de irrigação no segundo ciclo (2024)	51
Figura 11 – Produtividade da água na cultura do milho sob diferentes estratégias de irrigação e bioinsumos promotores de crescimento no primeiro ciclo (2023)	52

Figura 12 – Transpiração (A) e condutância estomática (B) do milho sob diferentes estratégias de irrigação no primeiro ciclo de cultivo aos 64 DAS (2023)	57
Figura 13 – Transpiração (A) e condutância estomática (B) do milho sob diferentes manejos de bioinsumos promotores de crescimento no primeiro ciclo de cultivo aos 64 DAS (2023)	59
Figura 14 – Concentração interna de CO ₂ na cultura do milho sob diferentes estratégias de irrigação e bioinsumos promotores de crescimento no primeiro ciclo aos 64 DAS (2023)	61
Figura 15 – Concentração interna de CO ₂ (A) e relação entre fotossíntese e concentração interna de CO ₂ (B) na cultura do milho sob diferentes estratégias de irrigação e bioinsumos promotores de crescimento no segundo ciclo aos 72 DAS (2024)	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização física e química do solo da área experimental na camada 0-20 cm antes da implantação da cultura em campo.	33
Tabela 2 – Resumo da análise de variância pelo quadrado médio para diâmetro da espiga (DE), comprimento da espiga (CE), número de fileiras por espiga (NF), número de grãos por fileira (NGF), massa de 100 grãos (M100), massa de sabugo (MS), massa fresca da espiga com palha (MFC) e massa fresca da espiga sem palha (MFS), produção por planta (PP) e produtividade (PROD), da cultura do milho no primeiro (2023) e segundo ciclo (2024)	42
Tabela 3 – Resumo da análise de variância pelo quadrado médio para o Índice SPAD em três avaliações	54
Tabela 4 – Resumo da análise de variância pelo quadrado médio para A, E, gs, Ci e A/Ci em três avaliações no primeiro ciclo e duas avaliações no segundo ciclo	55
Tabela 5 – Valores de Yr, Ym, (1 – Yr/Ym), (1 – ETr/ETm) e dos coeficientes de sensibilidade Ky no primeiro e segundo ciclo de cultivo do milho	65
Tabela 6 – VBP e parâmetros utilizados para cálculo da renda do agricultor (RA) de cada sistema de produção no ciclo de cultivo do milho em 2023	70
Tabela 7 – VBP e parâmetros utilizados para cálculo da renda do agricultor (RA) de cada sistema de produção no ciclo de cultivo do milho em 2024	71
Tabela 8 – Equações lineares relacionando a renda do agricultor e a área cultivada	73
Tabela 9 – Área mínima para assegurar o nível de reprodução social (AM-NRS) nos diferentes tratamentos em 2023 e 2024	74

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	Importância econômica e características gerais da cultura do milho	18
2.2	Déficit hídrico e seus efeitos sobre as plantas	19
2.3	Irrigação deficitária	20
2.4	Bioinsumos	22
2.4.1	<i>Bacillus aryabhattachai</i>	23
2.4.2	<i>Azospirillum brasilense</i>	24
2.5	Trocas gasosas	25
2.6	Fator de sensibilidade ao déficit hídrico (Ky)	27
2.7	ANÁLISE ECONÔMICO-SOCIAL	28
3	MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1	Caracterização da área de estudo	29
3.2	Delineamento experimental e tratamentos	33
3.3	Condução da área experimental	35
3.4	Variáveis analisadas	37
3.4.1	<i>Índices fisiológicos</i>	37
3.4.2	<i>Aspectos produtivos e eficiência do uso da água</i>	38
3.4.3	<i>Coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (Ky)</i>	38
3.4.4	<i>Análise econômico-social</i>	39
3.5	Análise dos dados	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1	Variáveis agronômicas e produtividade	41
4.2	Variáveis fisiológicas	52
4.3	Coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (Ky)	64
4.4	Análise econômico-social	68
5	CONCLUSÕES	76
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

A cultura do milho (*Zea mays* L.) é amplamente cultivada em todo o mundo, sendo um dos cereais mais importantes devido à sua alta produtividade e ampla utilização na alimentação humana e animal, além de servir como matéria-prima para diversas indústrias (ALMEIDA *et al.*, 2017; TASHAYO *et al.*, 2020). No Brasil, o milho destaca-se como uma das principais culturas agrícolas, com uma produção que alcançou 115.722,8 mil toneladas na safra 2023/2024 (CONAB, 2024). Nesse mesmo período, a produtividade média nacional foi de aproximadamente 5.887 kg ha⁻¹, considerando as três safras do cereal (CONAB, 2024).

A cultura do milho também possui grande importância econômica no Nordeste do Brasil, sendo amplamente produzida nessa região. Ainda conforme dados da CONAB (2024), a região Nordeste teve uma produção estimada em 11.996 mil toneladas de milho em 2023, para fins comparativos.

O déficit hídrico é um dos principais fatores abióticos que limitam a produtividade do milho, especialmente em regiões áridas e semiáridas, e tem sido objeto de pesquisa em diversos estudos na área (CHAI *et al.*, 2016; NOGUEIRA *et al.*, 2023; NOGUEIRA *et al.*, 2024). Esse estresse ocorre quando a demanda por água excede a sua disponibilidade, afetando negativamente o crescimento inicial e o desenvolvimento das plantas (FERRARI *et al.*, 2015; GUIMARÃES *et al.*, 2019), a produtividade final da cultura (SOUSA *et al.*, 2023), causando desidratação celular, diminuição do potencial hídrico e da resistência hidráulica nos vasos do xilema, além de efeitos secundários como redução da expansão foliar, fechamento estomático e inibição da fotossíntese (TAIZ *et al.*, 2017). A resposta da planta ao déficit hídrico varia conforme o estádio de desenvolvimento, sendo particularmente prejudicial durante períodos críticos como a floração e o enchimento de grãos (CRUZ *et al.*, 2010; BERGAMASCHI *et al.*, 2004).

Para mitigar os efeitos do déficit hídrico, diversas estratégias têm sido estudadas, incluindo o desenvolvimento de cultivares mais tolerantes à seca, a melhoria das práticas de manejo da irrigação e a adoção de técnicas de cultivo que promovam a eficiência do uso da água (ARAÚJO JÚNIOR *et al.*, 2019; RAMAKRISHNA *et al.*, 2019). A irrigação deficitária, por exemplo, é uma técnica que visa otimizar o uso da água, aplicando-a em quantidades controladas para minimizar o estresse hídrico em fases críticas do desenvolvimento da planta (ZUAZO *et al.*, 2021).

Os bioinsumos, como as bactérias promotoras de crescimento (*Bacillus aryabhattai* e *Azospirillum brasilense*), têm emergido como uma alternativa promissora para

melhorar a resiliência das plantas ao estresse hídrico (SOUSA *et al.*, 2023; GAVILANES *et al.*, 2019). Esses microrganismos atuam por meio de múltiplos mecanismos, como a síntese de fitormônios (auxinas, citocininas e giberelinas), que estimulam o crescimento radicular, aumentando a capacidade da planta de explorar camadas mais profundas do solo em busca de água. Além disso, podem induzir a produção de exopolissacarídeos e osmólitos compatíveis, que contribuem para a manutenção da turgescência celular em condições de baixa disponibilidade hídrica, e melhorar a modulação estomática, reduzindo a perda de água por transpiração. Dessa forma, favorecem tanto a absorção de água quanto a manutenção da atividade fotossintética em situações de estresse, promovendo o crescimento vegetal e o uso mais eficiente dos recursos hídricos (MACHADO *et al.*, 2020).

Diversos aspectos explicam a ocorrência de maior resistência das plantas de milho a condições de déficit hídrico em virtude do emprego de bactérias promotoras de crescimento, como a ativação de mecanismos fisiológicos e morfológicos que favorecem a tolerância ao estresse, estímulo à produção de fitormônios, crescimento radicular e a absorção de nutrientes, promovendo maior eficiência do uso da água e condições para o crescimento vegetal, além do aumento na condutância estomática (HUNGRIA, 2011; FUKAMI *et al.*, 2016; VURUKONDA *et al.*, 2016; KAZI *et al.*, 2016). Destaca-se ainda que a utilização de bactérias promotoras de crescimento promove mudanças na atividade fotossintética da cultura, podendo afetar o teor de clorofitas *a* e *b* das folhas e outros pigmentos fotoprotetores auxiliares que podem conduzir a obtenção de plantas mais verdes e resistentes a condições de estresse hídrico (TAIZ *et al.*, 2017).

Todavia, para que o uso de bioinsumos seja efetivo sem comprometer a produtividade, é fundamental aprofundar as pesquisas sobre os níveis aceitáveis de déficit hídrico em cada fase fenológica da cultura. Evidências sugerem que a associação entre irrigação deficitária e a aplicação de bioinsumos promotores de crescimento, como *Bacillus aryabhattai* e *Azospirillum brasiliense*, pode aumentar a resiliência das plantas ao estresse hídrico. No entanto, os mecanismos de interação entre essas bactérias e as plantas ainda não são totalmente compreendidos. Isso reforça a necessidade de estudos mais aprofundados, como o presente trabalho, que visa investigar a sinergia entre estratégias de irrigação e o uso de bioinsumos.

Posto isso, foram testadas as seguintes hipóteses: a) A inoculação de *B. aryabhattai* contribui para a mitigação dos efeitos do déficit hídrico na cultura do milho, promovendo melhorias em variáveis agronômicas como produção por planta, produtividade e eficiência do uso da água, em comparação ao cultivo sem uso de bioinsumos; b) a aplicação

de *B. aryabhattai* coinoculado com *A. brasiliense* potencializam a expressão das variáveis de crescimento e a produtividade da cultura do milho em condições de déficit hídrico, em comparação ao cultivo sem emprego de bioinsumo; c) a utilização dos bioinsumos (*B. aryabhattai* e *A. brasiliense*) possibilitam reduzir o volume de água empregado no cultivo da cultura do milho mantendo os níveis de produtividade da cultura; e d) a inoculação com *B. aryabhattai*, isoladamente ou em coinoculação com *A. brasiliense*, melhora o desempenho fisiológico da cultura do milho em condições de déficit hídrico, promovendo maiores taxas de fotossíntese líquida, condutância estomática, transpiração e eficiência no uso interno do CO₂, quando comparado ao cultivo sem aplicação de bioinsumos; e) o uso de bioinsumos, isoladamente ou em coinoculação, contribui para a redução do coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (Ky) na cultura do milho, indicando maior tolerância ao estresse hídrico e maior estabilidade produtiva sob condições de irrigação com déficit; f) a aplicação de bioinsumos associadas a estratégias de irrigação deficitária promove ganhos econômicos mensuráveis, resultando em maior retorno econômico por hectare e menor área mínima necessária para assegurar a reprodução social da unidade produtiva, quando comparado ao cultivo sem uso de bioinsumos.

Diante do exposto, este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da inoculação e coinoculação das bactérias promotoras de crescimento *Bacillus aryabhattai* e *Azospirillum brasiliense* sobre o desempenho agronômico e fisiológico da cultura do milho sob condições de déficit hídrico, em diferentes fases fenológicas, além de avaliar a sensibilidade da cultura ao déficit hídrico e a viabilidade econômica dos sistemas de produção estudados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância econômica e características gerais da cultura do milho

O milho (*Zea mays* L.), classificado como uma gramínea da família Poaceae (anteriormente conhecida como Gramineae), faz parte da tribo Maydeae cujo surgimento remonta a pelo menos 8 a 10 mil anos, com indícios de origem na América Central ou no México. Essa planta herbácea é monóica, robusta, ereta, anual e apresenta altura que varia de um a quatro metros, destacando-se por sua alta capacidade de acumular fotoassimilados e produzir grãos de forma eficiente (MAGALHAES; SOUZA, 2011). As flores masculinas da espécie formam uma panícula no ápice da planta; já as flores femininas ficam localizadas nas áxilas foliares e geralmente são polinizadas pelo vento. Após a polinização se desenvolvem as espigas contendo grãos (BATEMAN *et al.*, 2006). O sistema radicular do milho é classificado como fasciculado. Ele é composto por uma raiz primária, que se desenvolve a partir da radícula, raízes seminais que se ramificam a partir do nó escutelar (adventícias) e raízes coronais de origem pós-embriônica (TAIZ *et al.*, 2017).

A cultura do milho é uma das mais importantes no contexto global devido à sua versatilidade e às múltiplas aplicações nos setores alimentício, forrageiro e industrial. Sua relevância se dá tanto em regiões desenvolvidas quanto em países em desenvolvimento, sendo amplamente cultivada em função de sua alta capacidade produtiva e ampla adaptabilidade a diversos ambientes climáticos, incluindo o semiárido brasileiro (DUARTE *et al.*, 2016; ALMEIDA *et al.*, 2017).

No Brasil, o milho ocupa posição de destaque como uma das principais culturas agrícolas. Na safra 2023/2024, o país produziu cerca de 115.722,8 mil toneladas, resultado da alta demanda por este cereal, especialmente nos setores de avicultura e suinocultura, que consomem aproximadamente 70% da produção nacional (CONAB, 2024; MIRANDA *et al.*, 2012). O milho também é essencial para a produção de biocombustíveis e como matéria-prima para indústrias alimentícias e químicas (TASHAYO *et al.*, 2020).

Do ponto de vista agronômico, o milho destaca-se por sua elevada capacidade de adaptação a condições climáticas adversas, incluindo regiões semiáridas. Essa capacidade decorre de suas características morfológicas e fisiológicas, como sistema radicular fasciculado que permite maior exploração do solo, metabolismo fotossintético do tipo C4, que aumenta a eficiência no uso da água e da luz solar, e ciclo de cultivo flexível, que varia de 110 a 180 dias

dependendo da cultivar e das condições ambientais (FORNASIERI FILHO, 2007; GALVÃO; BORÉM; PIMENTEL, 2017).

No semiárido, de forma mais relevante, a cultura do milho enfrenta desafios relacionados à irregularidade das chuvas e ao rápido esgotamento hídrico dos solos, o que torna essencial o desenvolvimento de estratégias para mitigar os impactos do déficit hídrico. Estudos apontam que a redução da área foliar e da fotossíntese, além de prejuízos na formação de grãos, são as principais consequências da limitação hídrica durante fases críticas do desenvolvimento da cultura, como a floração e o enchimento de grãos (FERRARI *et al.*, 2015; BERGAMASCHI *et al.*, 2004). Contudo, o milho permanece como uma opção viável para a região devido à sua relevância socioeconômica e às ações de pesquisa focadas na sustentabilidade da produção.

Diante do exposto, destaca-se que a adoção de práticas que integrem estratégias de irrigação deficitária, uso de bioinsumos e seleção de cultivares adaptadas representa um caminho promissor para a maximização da produtividade e sustentabilidade da cultura do milho no semiárido brasileiro (NOGUEIRA *et al.*, 2023; DUARTE *et al.*, 2016).

2.2 Déficit hídrico e seus efeitos sobre as plantas

A disponibilidade de água é um dos fatores mais determinantes para o crescimento e desenvolvimento das plantas, configurando-se como um elemento limitante na produção agrícola (PINTO; TÁVORA; PINTO, 2014). Tanto a escassez quanto o excesso hídrico podem resultar em efeitos adversos no desempenho das culturas, causando reduções significativas na produtividade. Em nível global, a falta de água representa um dos maiores desafios à expansão da produtividade agrícola, uma vez que compromete processos fisiológicos e bioquímicos essenciais ao metabolismo das plantas (REDDY; CHAITANYA; VIVEKANANDAN, 2004; SANTOS; CARLESSO, 1998; ALVES, 2013).

O déficit hídrico provoca diversas alterações nos caracteres fisiológicos e morfológicos das plantas. Segundo Bergamaschi *et al.* (2006), essa condição reduz a área foliar e as taxas fotossintéticas, além de impactar outros aspectos do metabolismo. A deficiência hídrica também modifica o balanço energético do sistema, levando a alterações no ambiente físico em que as plantas se desenvolvem. Algumas espécies apresentam adaptações evolutivas que favorecem a sobrevivência sob déficit hídrico, como o acúmulo de solutos nas células, facilitando a absorção de água do solo, e o fechamento estomático durante períodos

de maior demanda evaporativa, o que contribui para a manutenção do equilíbrio hídrico celular (PIMENTEL, 2004).

Na cultura do milho, o déficit hídrico é identificado como um dos principais estresses abióticos que afetam negativamente a produtividade, especialmente em regiões áridas e semiáridas, como o semiárido brasileiro (CHAI *et al.*, 2016; NOGUEIRA *et al.*, 2023; NOGUEIRA *et al.*, 2024). Esse estresse ocorre quando a demanda por água excede sua disponibilidade, causando desidratação celular, redução do potencial hídrico e menor condutividade hidráulica nos vasos do xilema. Ademais, surgem efeitos secundários como a menor expansão foliar, fechamento estomático e inibição da fotossíntese, sendo os estágios de floração e enchimento de grãos os mais sensíveis a essa condição (TAIZ; ZEIGER, 2017; CRUZ *et al.*, 2010; BERGAMASCHI *et al.*, 2004).

A agricultura irrigada, caracterizada pelo elevado consumo de água, utiliza grande parte desse recurso para atender à evapotranspiração das plantas e do solo, sem retorno imediato aos corpos hídricos. No Brasil, o setor agrícola é responsável por 67% do consumo consuntivo de água proveniente de mananciais (ANA, 2017). O crescimento populacional aliado ao aumento das atividades econômicas tem intensificado a escassez de água doce, criando um desafio significativo para a sustentabilidade da agricultura, principalmente em regiões áridas e semiáridas (SOARES *et al.*, 2018). Esse cenário destaca a necessidade de investir em pesquisas voltadas à compreensão das adaptações das culturas agrícolas ao déficit hídrico e ao desenvolvimento de estratégias que promovam maior eficiência no uso da água.

Diversas soluções têm sido estudadas para mitigar os impactos do déficit hídrico, entre elas, destacam-se o desenvolvimento de cultivares mais tolerantes à seca, a implementação de práticas de irrigação otimizadas e o uso de técnicas agrícolas que promovam o uso racional da água (ARAÚJO JÚNIOR *et al.*, 2019; RAMAKRISHNA *et al.*, 2019). A irrigação deficitária, por exemplo, é uma prática que visa maximizar a eficiência do uso da água, aplicando-a de forma controlada durante fases críticas do desenvolvimento das plantas, minimizando os efeitos adversos do estresse hídrico (ZUAZO *et al.*, 2021).

2.3 Irrigação deficitária

O manejo eficiente da irrigação desempenha um papel essencial tanto no incremento da produtividade agrícola quanto na melhoria da qualidade dos produtos vegetais. Para alcançar esses resultados, é imprescindível considerar fatores como a disponibilidade hídrica para o sistema de irrigação, a capacidade de retenção de água no solo e as demandas

hídricas específicas das culturas (SILVA *et al.*, 2010).

Em um cenário global marcado pelas mudanças climáticas, que incluem previsões de redução na precipitação em diversas regiões, a adoção de práticas de manejo capazes de otimizar o uso da água é de suma importância. Essa necessidade decorre da possibilidade de quedas expressivas na produtividade agrícola associadas à menor disponibilidade hídrica. Estratégias de gerenciamento agrícola, especialmente aquelas voltadas ao manejo de irrigação, surgem como alternativas promissoras para mitigar tais impactos. Além disso, o uso de cultivares geneticamente adaptadas à seca pode aumentar a resistência das plantas a estresses abióticos como o déficit hídrico (DAVIES *et al.*, 2011).

Entre as técnicas voltadas à conservação de água, destaca-se a irrigação deficitária, também conhecida como irrigação com déficit hídrico controlado. Essa abordagem, descrita por Zhang *et al.* (2019), consiste em aplicar volumes de água inferiores às necessidades hídricas completas das culturas, expondo-as a um estresse hídrico planejado. Essa prática se apresenta como uma solução viável sob os aspectos econômico e ambiental, promovendo maior sustentabilidade.

Os benefícios da irrigação deficitária incluem maior eficiência no uso da água e aumento da produtividade hídrica, além de melhorias na qualidade de produtos agrícolas, como atributos sensoriais que agregam valor comercial (DAVIES *et al.*, 2011; CANO-LAMADRID *et al.*, 2015). Essas melhorias podem incluir maior concentração de açúcares, compostos fenólicos e outros metabólitos secundários, que intensificam o sabor, aroma e cor dos frutos ou grãos. Isso ocorre porque o estresse hídrico moderado pode induzir respostas metabólicas que favorecem o acúmulo de substâncias relacionadas à qualidade organoléptica, como observado em culturas como videira, tomate e romã. Adicionalmente, essa técnica pode reduzir significativamente o consumo de energia elétrica nas propriedades rurais, uma vez que sistemas de irrigação frequentemente dependem de bombeamento. Gava *et al.* (2015) destacam que o manejo adequado da irrigação deficitária pode minimizar o uso de água e energia sem impactar de forma relevante a produtividade.

Estudos no semiárido brasileiro têm investigado a viabilidade da irrigação deficitária em diferentes culturas. Por exemplo, Santos *et al.* (2016) avaliaram sua aplicação na cultura da lima ácida, enquanto Santos *et al.* (2014) e Cotrim *et al.* (2017) examinaram seus efeitos na mangueira. Na bananeira, os impactos dessa estratégia foram analisados por Santos *et al.* (2017). No caso do milho, pesquisas como as de Martins *et al.* (2016) e Hayashi e Dogliotti (2021) têm explorado a utilização de irrigação deficitária em diversas regiões do Brasil e do mundo.

Embora a literatura indique reduções na produção do milho sob condições de déficit hídrico severo, ainda são escassas as informações sobre o impacto dessa técnica na região Nordeste. Em particular, faltam dados que associem a irrigação deficitária ao uso de bioinsumos promotores de crescimento como estratégia para aumentar a resiliência das plantas ao estresse hídrico.

2.4 Bioinsumos

A crescente demanda por produção agrícola mais eficiente e menos dependente de insumos químicos tradicionais tem impulsionado a busca por alternativas sustentáveis que promovam a fertilidade do solo e a produtividade das culturas. Nesse cenário, o uso de bioinsumos e bioestimulantes tem ganhado relevância, com destaque para sua capacidade de estimular processos fisiológicos das plantas, aumentando a eficiência na absorção de nutrientes e reduzindo a dependência de fertilizantes sintéticos (MANDAL *et al.*, 2023).

Embora o conceito de bioinsumos ainda não seja amplamente padronizado na literatura, pode-se defini-los, de forma geral, como insumos derivados de organismos vivos. No Brasil, o Decreto Federal nº 10.375 de 2020 regulamenta os bioinsumos e institui o Programa Nacional de Bioinsumos, com o objetivo de promover o desenvolvimento e a adoção dessa tecnologia no setor agropecuário (BRASIL, 2020). Segundo essa regulamentação, os bioinsumos compreendem produtos, processos ou tecnologias de origem biológica que interferem positivamente no desenvolvimento de plantas, animais ou microrganismos, atuando de forma integrada com os processos biológicos, físico-químicos e ecológicos (BRASIL, 2020).

Bioestimulantes, uma categoria de bioinsumos, incluem substâncias como ácidos húmicos e fúlvicos, biopolímeros, compostos inorgânicos, bactérias e fungos benéficos, além de extratos de algas marinhas. Essas substâncias favorecem o crescimento das plantas e aumentam sua tolerância a estresses abióticos, promovendo maior eficiência na utilização de recursos naturais (MANDAL *et al.*, 2023; HAMID *et al.*, 2021). Entre os bioinsumos, as bactérias promotoras de crescimento vegetal se destacam devido à sua habilidade de estimular o desenvolvimento radicular, melhorar a absorção de nutrientes e promover o crescimento vegetativo, além de elevar a produtividade das culturas (MARIANO *et al.*, 2004; AMORIM; MELO, 2002).

O sucesso dessas interações depende do processo de inoculação, em que as bactérias são atraídas por compostos químicos, como betaina e isoflavonoides, liberados pelas

raízes das plantas (TAIZ; ZEIGER, 2017). Esse processo resulta em uma associação benéfica: as plantas fornecem nutrientes às bactérias, enquanto estas contribuem para a tolerância a estresses e a aquisição de nutrientes (LABANCA, 2019). Ademais, a coinoculação, que envolve o uso combinado de diferentes microrganismos, tem se mostrado eficaz na maximização dos benefícios associados ao uso de bioinsumos, gerando efeitos sinérgicos e resultados produtivos superiores (BÁRBARO *et al.*, 2009).

Entre as bactérias promotoras de crescimento vegetal, duas espécies têm se destacado por seu uso consolidado: *Bacillus aryabhattachai* e *Azospirillum brasilense*. Essas bactérias, amplamente estudadas e aplicadas em diferentes culturas, apresentam potencial significativo para melhorar a resiliência das plantas frente a condições adversas e otimizar a produtividade em sistemas agrícolas sustentáveis.

2.4.1 *Bacillus aryabhattachai*

O gênero *Bacillus*, pertencente à família Bacillaceae, compreende mais de 200 espécies de bactérias com formato bacilar. Essas bactérias Gram-positivas possuem a capacidade de formar endósporos, o que lhes confere grande resistência a condições ambientais adversas. Além disso, apresentam uma ampla diversidade metabólica, incluindo propriedades surfactantes e a produção de fitormônios que favorecem o crescimento vegetal (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Rizobactérias do gênero *Bacillus* são amplamente empregadas na formulação de inoculantes bacterianos voltados para aplicação em plantas. Por serem heterotróficas, desempenham papel essencial nos ciclos do carbono e do nitrogênio, atuando como desnitrificantes, fixadores de nitrogênio e decompositores de compostos orgânicos nitrogenados (VITTO, 2023). Nos últimos anos, a coinoculação, que combina diferentes bactérias promotoras de crescimento vegetal, tem se destacado como uma estratégia eficaz para aumentar a produtividade das culturas agrícolas, superando os resultados obtidos com a inoculação isolada (SANTOS; NOGUEIRA; HUNGRIA, 2021).

As espécies do gênero *Bacillus* contribuem significativamente para a promoção do crescimento vegetal por meio de mecanismos diretos e indiretos, como a produção de fitormônios, compostos antifúngicos e a melhoria na absorção de fósforo e nitrogênio (ABREU *et al.*, 2022). Entre essas espécies, *B. aryabhattachai* é particularmente relevante. Trata-se de uma bactéria Gram-positiva em forma de bastonete, com capacidade de esporulação e que forma colônias com diâmetro entre 5 e 8 mm. Sua aplicação como promotora de

crescimento foi relatada pela primeira vez na Coreia do Sul, em estudos com a planta *Xanthium italicum* (LEE *et al.*, 2012).

A identificação inicial de *B. aryabhattai* ocorreu em 2009, com o isolamento da espécie a partir de criotubos utilizados na coleta de amostras de ar da estratosfera terrestre (SHIVAJI *et al.*, 2009). No Brasil, os estudos com essa bactéria ganharam destaque com a identificação de cepas na rizosfera do mandacaru (*Cereus jamacaru*), uma cactácea nativa da Caatinga. Entre elas, a cepa CMAA 1363 foi isolada pela Embrapa e demonstrou capacidade de conferir tolerância ao déficit hídrico no milho (KAVAMURA *et al.*, 2017; EMBRAPA, 2021). Essas descobertas reforçam o potencial do gênero *Bacillus* como ferramenta biotecnológica para aumentar a resiliência das culturas frente a condições adversas e promover a sustentabilidade na agricultura.

2.4.2 *Azospirillum brasiliense*

A identificação de bactérias associativas capazes de realizar a fixação biológica de nitrogênio (FBN) em gramíneas constitui-se em uma relevante contribuição histórica da Dra. Johanna Döbereiner (1924-2000), pesquisadora da Embrapa. Entre essas bactérias destaca-se o gênero *Azospirillum*, que inicialmente foi classificado como *Spirillum* (TARRAND *et al.*, 1978) e, posteriormente, teve o prefixo “azo” incorporado, em referência ao termo utilizado por Lavoisier para denominar o nitrogênio (HUNGRIA, 2011).

As bactérias do gênero *Azospirillum* são microrganismos fixadores de nitrogênio de vida livre que excretam parte do nitrogênio fixado diretamente para a planta. Esse processo ocorre por meio da nitrogenase, que converte o N atmosférico em amônia, contribuindo para o suprimento de nitrogênio às plantas (HUNGRIA, 2011). Entre as espécies desse gênero, *Azospirillum brasiliense* destaca-se por seus benefícios no desenvolvimento vegetal, como a produção de fitormônios, melhoria da eficiência na absorção de água e nutrientes, e aumento da tolerância a estresses abióticos, como seca e salinidade (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

Estudos conduzidos pela Embrapa Soja e pela Universidade Federal do Paraná (UFPR) comprovaram a eficiência agronômica de estirpes de *Azospirillum brasiliense* (Ab-V4, Ab-V5, Ab-V6 e Ab-V7). Ensaios de campo demonstraram que essas estirpes promoveram ganhos significativos na produtividade de grãos de milho, variando entre 662 e 823 kg ha⁻¹, correspondendo a incrementos de 24% a 30%, respectivamente, em relação a plantas não inoculadas (JUNIOR BASSETTO *et al.*, 2020). Esse resultado levou à aprovação do uso dessas estirpes pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA).

A inoculação com *Azospirillum*, além de contribuir para a fixação biológica do nitrogênio, também estimula o crescimento da parte aérea e das raízes, aumenta a eficiência do uso de fertilizantes minerais e reduz os custos de produção da cultura do milho (BENSEN *et al.*, 2020; DUARTE, RUFF, SANTOS, 2021). Fancelli (2010) aponta que essa prática pode resultar em uma economia de 30 a 50 kg ha⁻¹ de fertilizantes nitrogenados, tornando-se uma estratégia comparável às economias obtidas em leguminosas.

Além disso, *Azospirillum* é capaz de sintetizar fitormônios como auxinas, citocininas e giberelinas, bem como enzimas como ACC-deaminase, que reduz os níveis de etileno. Essa ação atrasa a senescência das plantas, prolongando o estágio de “stay green”, o que permite à planta manter a coloração verde mesmo em estágios avançados de maturidade da espiga, promovendo maior produtividade (VITTO, 2023). Assim, o uso de *Azospirillum brasiliense* representa uma solução promissora para sistemas de cultivo mais sustentáveis e economicamente viáveis.

2.5 Trocas gasosas

A avaliação de trocas gasosas constitui-se em uma importante ferramenta para a compreensão do desempenho fisiológico de plantas sob diferentes condições de cultivo, sendo amplamente utilizada em pesquisas que investigam o impacto de estresses bióticos e abióticos. Através da quantificação de parâmetros como a taxa fotossintética líquida, transpiração, condutância estomática, concentração interna de CO₂ e a razão entre fotossíntese e concentração interna de CO₂, é possível inferir sobre a eficiência fotossintética, o status hídrico e a capacidade de uso dos recursos pelas plantas (TAIZ *et al.*, 2017; FLEXAS *et al.*, 2013).

Na cultura do milho (*Zea mays* L.), amplamente cultivada em diversas regiões do mundo e de grande importância econômica e alimentar, conforme abordado anteriormente, as trocas gasosas são sensivelmente afetadas por fatores ambientais, especialmente pelo déficit hídrico. Em condições de limitação hídrica, verifica-se o fechamento estomático como mecanismo de defesa para redução da perda de água, o que, por sua vez, limita a difusão de CO₂ para o mesofilo foliar, reduzindo a fotossíntese (CHAVES *et al.*, 2009). A redução da condutância estomática, portanto, está diretamente correlacionada à queda na assimilação de carbono, o que prejudica o crescimento e a produtividade da cultura.

A análise da concentração interna de CO₂ (Ci) é outro importante indicador da atividade fotossintética. Em plantas saudáveis e com adequado suprimento hídrico, a Ci tende

a manter-se em níveis moderados, refletindo um equilíbrio entre a absorção de CO₂ e sua fixação pelo ciclo de Calvin. No entanto, sob déficit hídrico severo, a Ci pode aumentar devido à limitação na utilização do CO₂ interno, mesmo com os estômatos parcialmente fechados, indicando comprometimento bioquímico do aparato fotossintético (FLEXAS; MEDRANO, 2002).

A aplicação de bioinsumos como *Bacillus aryabhattai* e *Azospirillum brasilense* tem sido apontada como estratégia promissora para mitigar os efeitos deletérios do déficit hídrico sobre o metabolismo vegetal. Esses microrganismos promovem o crescimento vegetal por diferentes mecanismos, incluindo a produção de fitohormônios (como o ácido abscísico e auxinas), incremento da absorção de nutrientes, indução de tolerância sistêmica e aumento da eficiência no uso da água (KOHLER *et al.*, 2008; VURUKONDA *et al.*, 2016). Estudos demonstram que a inoculação com rizobactérias promotoras de crescimento pode melhorar as taxas fotossintéticas, a condutância estomática e a eficiência da carboxilação sob déficit hídrico (SILVA *et al.*, 2021).

Além disso, a razão entre fotossíntese e concentração interna de CO₂, considerada uma estimativa da eficiência instantânea de carboxilação da Rubisco, é amplamente utilizada como um indicador da eficiência do uso de carbono pelas plantas. Reduções neste parâmetro indicam limitações não apenas estomáticas, mas também metabólicas, relacionadas à capacidade de assimilação do carbono atmosférico, especialmente sob condições de estresse (TAIZ; ZEIGER, 2017). O uso de bioinsumos pode contribuir para a manutenção ou até elevação desta razão, promovendo maior resiliência fisiológica em ambientes com recursos hídricos limitados.

A fotossíntese, variável central entre as trocas gasosas, é diretamente afetada por alterações na condutância estomática e na disponibilidade de CO₂. Além disso, é modulada por fatores como temperatura, irradiação e nutrição. A inoculação com microrganismos benéficos pode otimizar esses fatores ao favorecer o equilíbrio osmótico, retardar o fechamento estomático sob estresse e manter a integridade da maquinaria fotossintética (FLEXAS *et al.*, 2013).

A transpiração, por sua vez, não apenas representa a perda de água pelas folhas, mas está intimamente associada ao resfriamento da planta e ao transporte de nutrientes. A manutenção de taxas adequadas de transpiração é, portanto, um fator essencial para o desempenho do milho em regiões de clima semiárido, como no Nordeste brasileiro, onde o déficit hídrico é característico. Estratégias que promovam maior eficiência no uso da água, sem comprometer a taxa de assimilação de carbono, são, portanto, de grande relevância

agronômica (CONDON *et al.*, 2004).

Diante disso, estudos sobre trocas gasosas na cultura do milho são especialmente relevantes para o entendimento da fisiologia da planta sob diferentes estratégias de produção, como em sistemas que envolvem inoculação com bioinsumos e restrição hídrica. A análise integrada dessas variáveis permite compreender os mecanismos de adaptação das plantas e orientar práticas agronômicas mais sustentáveis e produtivas.

2.6 Fator de sensibilidade ao déficit hídrico (Ky)

O déficit hídrico é uma das principais limitações ao desenvolvimento agrícola em regiões semiáridas, sendo responsável por alterações fisiológicas e redução do potencial produtivo das culturas. Para compreender e quantificar os impactos do estresse hídrico, diversos indicadores têm sido propostos. Entre eles, destaca-se o fator de sensibilidade ao déficit hídrico (Ky), desenvolvido por Doorenbos e Kassam (1979), que se tornou um dos parâmetros mais utilizados para avaliar a resposta das culturas à redução na disponibilidade hídrica ao longo do ciclo de cultivo.

O coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (Ky) é uma ferramenta utilizada para expressar o grau de resposta das plantas à limitação de água, podendo ser aplicado tanto em fases específicas do ciclo da cultura quanto ao longo de todo o período de desenvolvimento (AZEVEDO *et al.*, 2016). A análise dessa resposta é fundamental no planejamento agrícola, pois permite identificar os momentos mais críticos em que o déficit hídrico pode comprometer a produtividade.

Na prática o Ky representa a relação entre a redução relativa na produtividade (Y_r) e a redução relativa na evapotranspiração (ET). Essa relação permite identificar o quanto a redução da água disponível impacta a produtividade da cultura. Quanto maior o valor de Ky, maior a sensibilidade da planta ao estresse hídrico. De acordo com o boletim FAO 33 (DOORENBOS; KASSAM, 1979), os valores de Ky podem ser classificados como: baixo (< 0,85), médio-baixo (0,85–1,0), médio-alto (1,0–1,15) e alto (> 1,15). Já o boletim FAO 66 propõe outra classificação: pouco sensível (Ky < 1), proporcionalmente sensível (Ky = 1) e muito sensível (Ky > 1).

Estudos como o de Bilibio *et al.* (2010) indicam que o valor de Ky pode ser determinado pela inclinação da reta obtida em uma regressão linear entre as reduções relativas de rendimento e de evapotranspiração. A precisão desse coeficiente depende, portanto, da uniformidade das condições de cultivo e da confiabilidade das estimativas de rendimento e

evapotranspiração. Além disso, como ressaltado por Istanbulluoglu (2009), o cálculo do Ky em diferentes fases fenológicas permite identificar os períodos críticos da cultura quanto à necessidade hídrica, o que é essencial para o manejo da irrigação com economia de água.

Posto isso, o fator Ky é uma ferramenta relevante para o dimensionamento de estratégias de irrigação deficitária, especialmente em regiões com baixa disponibilidade hídrica, como o semiárido nordestino. Além disso, sua utilização permite aliar produtividade agrícola e uso racional da água, atendendo a princípios de sustentabilidade e eficiência agronômica.

2.7 Análise econômica-social

A agricultura familiar tem se consolidado de forma crescente, ampliando sua diversidade produtiva e desempenhando um papel essencial no abastecimento do mercado interno, no fornecimento de matéria-prima para agroindústrias e na participação nas exportações brasileiras. Além disso, destaca-se como importante geradora de emprego e renda. Essa diversificação produtiva torna-se um elemento chave para compreender a atuação econômica da agricultura familiar na sociedade. Avaliar economicamente os sistemas de produção é, portanto, indispensável, e isso requer compreender a renda obtida pelo agricultor, uma vez que fatores como a permanência na atividade agropecuária, a fixação da população no meio rural e a melhoria das condições de vida estão diretamente ligados à sua sustentabilidade financeira (DAMASCENO; KHAN; LIMA, 2011).

Segundo Silva Neto (2005), o desempenho econômico de uma propriedade agrícola pode ser mensurado por meio de indicadores como o valor agregado da produção (VA) e a renda do agricultor (RA). O VA corresponde à diferença entre o valor bruto da produção (VBP) e os custos fixos, variáveis e a depreciação de máquinas e equipamentos. Já a RA é obtida subtraindo-se do VA os encargos financeiros (juros), os salários pagos à mão de obra e os tributos, como o Imposto Territorial Rural (ITR). Essa metodologia busca retratar a real capacidade da unidade produtiva de gerar retorno financeiro e sustentar socialmente o agricultor e sua família (SILVA NETO, 2005).

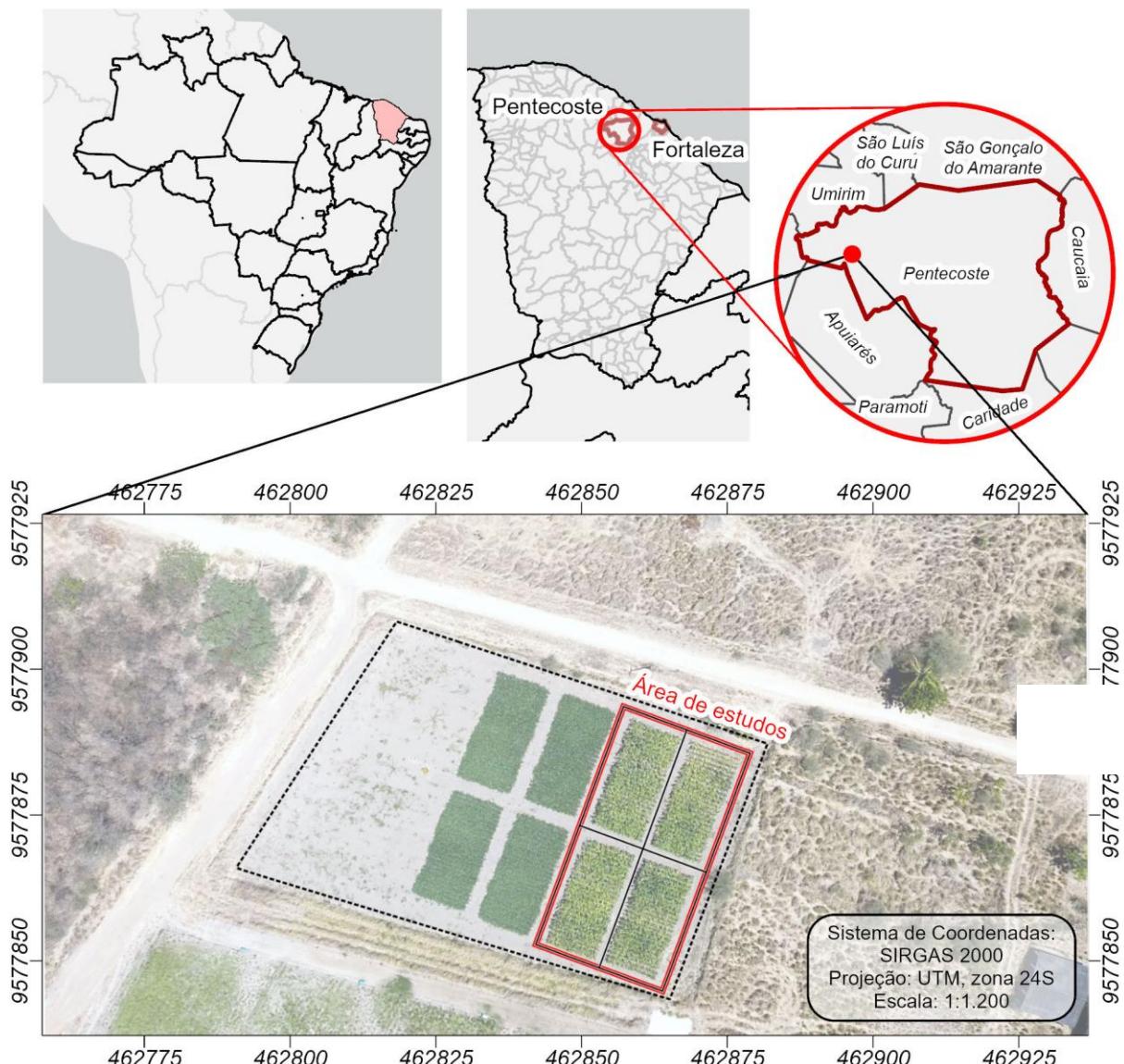
Portanto, a análise econômica, aliada à avaliação agronômica, permite uma abordagem mais integrada da viabilidade de práticas de manejo em sistemas irrigados. Essa perspectiva é especialmente relevante no contexto de pesquisa aplicada, onde o objetivo é gerar soluções que sejam tecnicamente eficazes e economicamente viáveis para agricultores, em especial os de base familiar.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi conduzido em campo, na Fazenda Experimental Vale do Curu - FEVC, área de estudos vinculada ao Centro de Ciências Agrárias – CCA da Universidade Federal do Ceará – UFC, em dois ciclos, no período de agosto a novembro de 2023 e setembro a dezembro de 2024. A fazenda está localizada no município de Pentecoste, Ceará, Brasil, cujas coordenadas geográficas são $03^{\circ} 49' 08''$ S e $39^{\circ} 20' 02''$ W.

Figura 1. Localização da área estudos na Fazenda Experimental Vale do Curu, Pentecoste, Ceará.

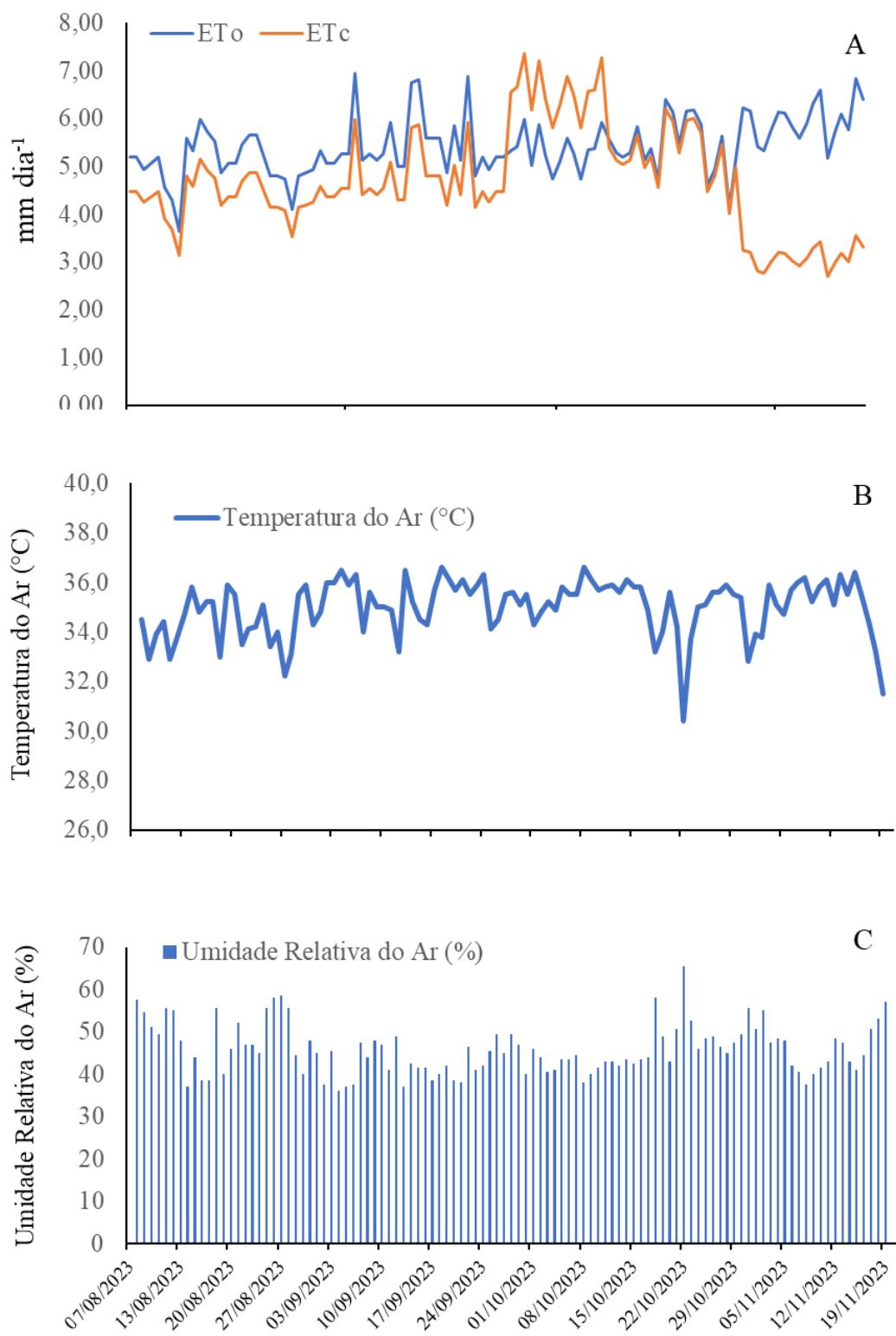


Fonte: Elaborado pelo Autor

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é quente e semiárido (BSw'h'), com chuvas irregulares que ocorrem de fevereiro a maio.

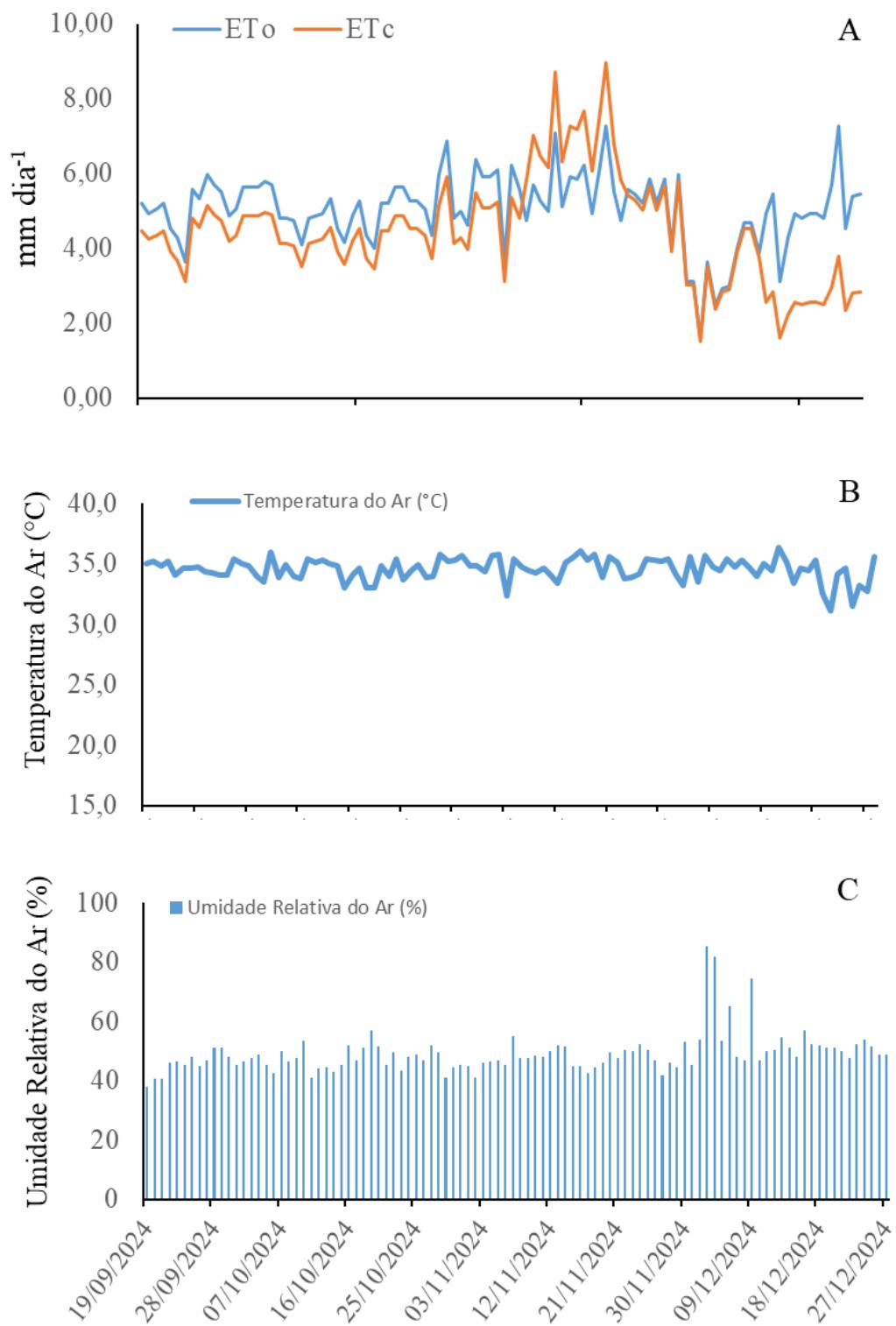
A ausência de precipitação significativa no primeiro ciclo e a ocorrência de um evento pluviométrico isolado no segundo ciclo (32 mm em 05/12/2024) são condizentes com a sazonalidade das chuvas na região. Os dados de evapotranspiração de referência e evapotranspiração da cultura, temperatura e umidade relativa do ar no primeiro (2023) e segundo ciclos (2024), estão apresentados de forma respectiva nas figuras 2 e 3 a seguir.

Figura 2. Evapotranspiração de referência (ET₀) e evapotranspiração da cultura (ET_c) (A), temperatura do ar (B) e umidade relativa do ar (C), durante o primeiro ciclo de cultivo do experimento (07 de agosto a 19 de novembro de 2023).



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 3. Evapotranspiração de referência (ET₀) e evapotranspiração da cultura (ET_c) (A), temperatura do ar (B) e umidade relativa do ar (C), durante o segundo ciclo de cultivo do experimento (19 de setembro a 27 de dezembro de 2024).



Fonte: Elaborado pelo Autor

O solo da área experimental foi classificado como Neossolo Flúvico com origem associada à deposição de sedimentos aluviais Andrade *et al.* (2010), com textura franca e

relevo tipicamente plano. De modo geral, caracteriza-se como um solo de média capacidade de retenção de água, com pH neutro e sem problemas de salinidade e sodicidade, adequado ao cultivo da cultura em estudo. Na tabela 1, constam os atributos físicos e químicos do solo da área de estudo, mediante análises realizadas conforme Teixeira *et al.* (2017).

Tabela 1. Caracterização física e química do solo da área experimental na camada 0-20 cm antes da implantação da cultura em campo.

Atributo	Valor	Atributo	Valor
Areia grossa (g kg ⁻¹)	52	V (%)	90
Areia fina (g kg ⁻¹)	319	MO (g kg ⁻¹)	16,45
Silte (g kg ⁻¹)	432	P assimilável (mg kg ⁻¹)	37
Argila (g kg ⁻¹)	197	Ca ²⁺ cmol _c kg ⁻¹	11,2
Argila natural (g kg ⁻¹)	160	Mg ²⁺ cmol _c kg ⁻¹	1,6
Classe textural	Franca	Na ⁺ cmol _c kg ⁻¹	0,31
Densidade do solo (g cm ⁻³)	1,25	K ⁺ cmol _c kg ⁻¹	0,57
pH	7	H ⁺ +Al ³⁺ cmol _c kg ⁻¹	1,49
CEes (dS m ⁻¹)	0,38	Al ³⁺ cmol _c kg ⁻¹	0,1
C (g kg ⁻¹)	9,54	S cmol _c kg ⁻¹	13,7
N (g kg ⁻¹)	1,05	T cmol _c kg ⁻¹	15,2
PST (%)	2		

CE – Condutividade elétrica; C – Carbono orgânico; N – Nitrogênio total; PST – Percentagem de Sódio Trocável; V – Saturação por bases; MO - Matéria orgânica; P - Fósforo; Ca - Cálcio; Mg – Magnésio; Na – Sódio; K - Potássio; H + Al - Acidez potencial; Al - Alumínio; S – Soma de bases; T – Capacidade de troca catiônica.

Fonte: Elaborado pelo Autor

3.2 Delineamento experimental e tratamentos

O estudo foi conduzido em dois ciclos de produção nos anos de 2023 e 2024, sob delineamento de blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas, com 4 repetições, sendo avaliados diferentes estratégias de irrigação associados com quatro manejos de aplicação de bioinsumos.

As estratégias de irrigação foram distribuídos nas parcelas e definidos da seguinte maneira: I - Irrigação plena (IP), com a aplicação de 100% das necessidades hídricas da cultura ao longo de todo o ciclo; II - Irrigação com déficit regular (IDR50%), fornecendo 50% das necessidades hídricas da cultura durante todo o ciclo; III - Irrigação com déficit controlado (IDCV50%), fornecendo 50% das necessidades hídricas da cultura durante a fase de crescimento vegetativo; IV - Irrigação com déficit controlado (IDCF50%), fornecendo 50% das necessidades hídricas na fase de florescimento e formação dos grãos; V - Irrigação com déficit controlado na fase de enchimento de grão (IDCE50%), fornecendo apenas 50% das necessidades hídricas nesta fase. A definição do estádio fenológico das plantas para

distribuição dos tratamentos foi realizada por observação direta das mesmas, utilizando-se como base os critérios descritos por Ritchie, Hanway e Benson (2003). A aplicação dos tratamentos era iniciado após constatado que pelo menos 50% das plantas das parcelas que compõem o tratamento em específico haviam entrado na fase que descreve o mesmo. Observou-se padrão similar de tempo entre as parcelas para atingir as diferentes fases fenológicas.

Nas subparcelas, foram aplicados os tratamentos com bioinsumos promotores de crescimento, da seguinte forma: (A) inoculação com *Bacillus aryabhattachai*; (V) coinoculação com *B. aryabhattachai* + *A. brasiliense*, realizada simultaneamente via tratamento de sementes com a aplicação conjunta dos dois inoculantes; (P) controle positivo, com adição de nitrogênio mineral (ureia - 45% de N - na dose recomendada conforme a análise do solo), todavia sem a aplicação de bioinsumos; e (B) controle negativo, sem uso de nitrogênio mineral ou inoculação. Os tratamentos (P) e (B) foram utilizados como controles para comparação com as estratégias de inoculação. O tratamento P (controle positivo) permitiu avaliar o desempenho da cultura com suprimento exclusivo de nitrogênio mineral, sem bioinsumos, enquanto o tratamento B (controle negativo) serviu como referência para mensurar os efeitos da ausência total de nitrogênio e inoculação. Essas comparações são fundamentais para isolar os efeitos dos bioinsumos e da adubação nitrogenada sobre o desempenho agronômico do milho sob estresse hídrico.

A aplicação dos bioinsumos foi realizada via tratamento de sementes, de forma individual ou combinada, conforme o tratamento. Para a inoculação com *B. aryabhattachai*, utilizou-se a cepa CCT8087, na concentração de 1×10^9 UFC mL⁻¹, na dose de 5 mL kg⁻¹ de sementes. Para a coinoculação, foram aplicadas simultaneamente as cepas Ab-V5 e Ab-V6 de *A. brasiliense* (1×10^9 UFC mL⁻¹) juntamente com a cepa CCT8087 de *B. aryabhattachai*, totalizando 5 mL de cada inoculante por kg de sementes. A aplicação foi feita imediatamente antes da semeadura, homogeneizando os inoculantes em recipiente limpo, garantindo a aderência uniforme às sementes.

A parcela experimental ocupou uma área de 28,16 m² e as subparcelas 7,04 m² cada. Cada subparcela foi composta por 42 plantas distribuídas em 7 fileiras, sendo consideradas úteis as 6 plantas centrais da parcela, enquanto as demais foram usadas como bordadura.

3.3 Condução da cultura

Para condução do estudo utilizou-se o híbrido duplo do milho BRS2022, que possui boa adaptabilidade para cultivo na região Nordeste do Brasil. Realizou-se inicialmente a limpeza da área e em seguida procedeu-se o processo de gradagem na profundidade de 0-30 cm, conforme princípios do cultivo mínimo do solo.

A adubação foi realizada baseada nos resultados da análise de solo e nas exigências nutricionais da cultura, conforme recomendação de Fernandes (1993). Foram aplicados por ocasião da semeadura 30 kg ha⁻¹ de N (exceto no controle negativo, tratamento que não recebeu adubação nitrogenada), 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 20 kg ha⁻¹ de K₂O. Em cobertura foi aplicado 60 kg ha⁻¹ de N e 20 kg ha⁻¹ de K₂O. A adubação nitrogenada de cobertura foi dividida em duas parcelas iguais e distribuídas aos 25 e 40 dias após plantio, enquanto a adubação potássica recomendada como cobertura foi realizada em uma só aplicação juntamente com a primeira aplicação de cobertura da adubação nitrogenada, conforme recomendações de Fernandes (1993). Para todas as adubações realizadas, os fertilizantes foram levemente incorporados ao solo. As fontes de N, P₂O₅ e K₂O utilizadas foram, respectivamente, ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio.

Os tratos culturais consistiram basicamente de capinas manuais nas parcelas experimentais e controle de pragas. As capinas foram realizadas em um total de três nos primeiros 30 dias após a semeadura, com o objetivo de prevenir a competição da cultura com plantas daninhas, especialmente na fase inicial de desenvolvimento, considerada a mais crítica para o estabelecimento da cultura no campo. Para fins de controle fitossanitário, antecedendo a semeadura, foi realizada a aplicação em toda a área experimental e entorno, de um formicida a base de sulfluramida para controle de formiga cortadeira, presente na área de estudo, em quantidade de 10 g de produto comercial por m². É relevante destacar que não foi observado a ocorrência da lagarta do cartucho (*Spodoptera frugiperda*) na área de estudo.

A semeadura foi realizada de forma manual diretamente no solo a uma profundidade de 0,05 m, sendo cobertas em seguida por uma fina camada de solo. Foram semeadas três sementes por cova, desbastando-as aos 10 dias após semeadura, mantendo somente uma planta por cova. O espaçamento empregado foi de 0,50 m entre linhas e 0,33 m entre plantas, de modo a obter uma densidade de plantio de 60,6 mil plantas por hectare. As sementes do híbrido de milho utilizado (BRS2022) proporciona plantas de moderada resistência a algumas doenças, como pinta branca e ferrugens branca e polissora e boa tolerância ao acamamento e ao quebramento (PACHECO *et al.*, 2009).

O sistema de irrigação instalado foi do tipo localizado por gotejamento, utilizando fita gotejadora com diâmetro de 16 mm, vazão de 1,6 L h⁻¹, pressão de serviço de 10 mca e espaçamento entre emissores de 0,30 m. O manejo da irrigação foi realizado via clima com auxílio de um Tanque Classe A, instalado próximo à área experimental. Para tanto, determinou-se a evapotranspiração de referência (ET₀) pelo produto da evaporação do tanque (ECA) e coeficiente do tanque (K_p). A evapotranspiração da cultura (ET_c) foi determinada através da multiplicação da ET₀ pelo coeficiente da cultura (K_c). Os valores de K_c utilizados foram 0,86 para a fase vegetativa, 1,23 para a fase de floração, 0,97 para a fase de enchimento dos grãos e 0,52 para a fase de maturação, valores definidos conforme Souza *et al.* (2015). As irrigações foram realizadas diariamente, conforme a definição de cada tratamento.

A água utilizada na irrigação foi de origem superficial com condutividade elétrica estimada em 0,75 dS m⁻¹.

Para estimativa do tempo de irrigação, empregou-se a seguinte equação:

$$Ti = \frac{ETcloc \times Se \times Sf \times Fl \times 60}{NEP \times Ea \times qa} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

Ti: tempo de irrigação, em minutos;

ETcloc: evapotranspiração localizada, em mm dia⁻¹;

Se: espaçamento entre emissores, em m;

Sf: espaçamento entre linhas laterais, em m;

Fl: porcentagem da lâmina definida pelo tratamento, adimensional;

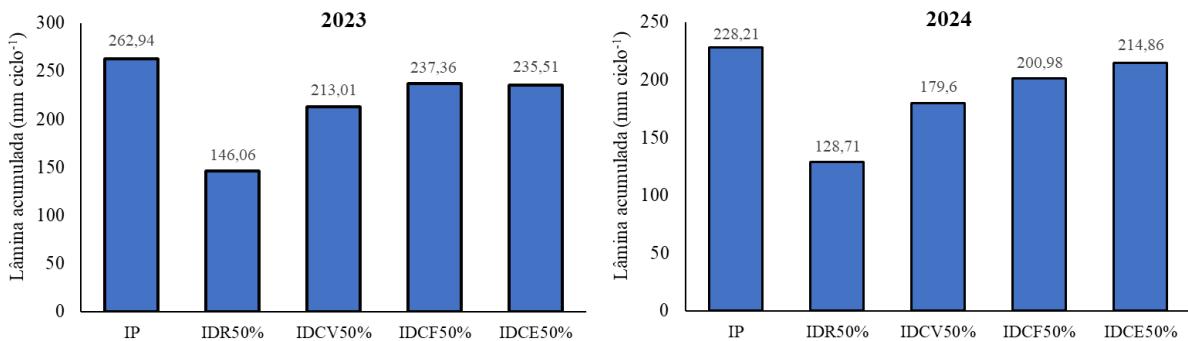
Ea: eficiência de aplicação, adimensional;

Qa: vazão média de cada gotejador, L h⁻¹;

NEP: número de emissores por planta.

Na Figura 4 a seguir constam as lâminas acumuladas por ciclo correspondentes aos tratamentos IP, IDR50%, IDCV50%, IDCF50% e IDCE50% no primeiro e no segundo ciclo.

Figura 4. Lâminas acumuladas nas diferentes estratégias de irrigação estudadas no primeiro (2023) e segundo ciclos (2024).



Fonte: Elaborado pelo Autor

3.4 Variáveis analisadas

3.4.1 Índices fisiológicos

As taxas de fotossíntese líquida (A , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), transpiração (E , $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), condutância estomática (gs , $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e concentração interna de CO_2 (Ci , ppm) foram estimadas usando um analisador de gás infravermelho (IRGA, Mod. Li-COR® 6400 XT). As medições foram realizadas no período de 9:00 às 11:00hrs. Foram realizadas três leituras no primeiro ciclo, aos 50, 64 e 79 dias após semeadura, e duas leituras segundo ciclo, aos 55 e 72 dias após semeadura.

As informações de trocas gasosas foram utilizadas para a estimativa da eficiência instantânea de carboxilação, calculada pela razão entre a fotossíntese e a concentração interna de CO_2 (A/Ci , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} / \mu\text{mol mol}^{-1}$).

Foi estimado o índice relativo de clorofila (Índice SPAD), expressos em unidades SPAD, utilizando um medidor portátil (SPAD 502, Minolta Co, Ltd, Osaka, Japan). As leituras foram realizadas na folha plenamente expandida situada imediatamente abaixo da espiga, ao final de cada fase fenológica considerada.

3.4.2 Aspectos produtivos e eficiência do uso da água

A colheita ocorreu aos 100 e 104 dias após a semeadura (DAS), nos dias 19 de novembro de 2023 (primeiro ciclo) e 27 de dezembro de 2024 (segundo ciclo), respectivamente. Avaliaram-se as seguintes características biométricas das plantas: massa

fresca da espiga com palha (MFC, g) e massa fresca da espiga sem palha (MFS, g), estimada em balança digital com precisão de quatro casas decimais, diâmetro da espiga (DE, mm) e comprimento da espiga (CE, cm), estimada com o auxílio de um paquímetro digital, número de fileiras por espiga (NF) e número de grãos por fileira (NGF, grãos fileira⁻¹), parâmetros determinados por contagem manual, massa de cem grãos (M100, g) e massa de sabugo (MS, g), estimada em balança digital de quatro casas decimais, produção por planta (PP, g planta⁻¹) e produtividade (PROD, kg ha⁻¹), estimada considerando um estande de 60,6 mil plantas por hectare.

Na estimativa da produção por planta, os grãos, após a debulha, foram secos em estufa de circulação de ar forçada a 65 °C, até atingir massa constante. Posteriormente, o material foi pesado em balança de precisão e a massa corrigida para 13% de umidade.

A eficiência do uso da água foi obtida por meio da produtividade da água de irrigação (PAir), calculada pela relação entre o valor da produtividade total (PROD, kg ha⁻¹) e a quantidade de água aplicada na irrigação (m³ ha⁻¹), em cada tratamento ao final do ciclo (Fernandez *et al.*, 2020), conforme equação:

$$PAir = PROD \div ITN \quad (2)$$

Em que:

PAir: Produtividade da água de irrigação (kg m⁻³);

Y: Produtividade da cultura (kg ha⁻¹);

ITN: Volume de água aplicado por irrigação (m³ ha⁻¹).

3.4.3 Coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (Ky)

A estimativa do coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (ky) foi realizada conforme Doorenbos e Kassam (1994). Esse fator relaciona a queda de rendimento relativo [1-(Yr/Ym)] com o déficit de evapotranspiração relativa, dada por [1- (ETr/ETm)]. Em termos matemáticos, o Ky é dado por:

$$Ky = [1 - (Yr / Ym)] / [1 - ETr / ETm] \quad (3)$$

Em que: Ky: fator de sensibilidade ao déficit hídrico (adimensional).

Yr: rendimento real da cultura sob déficit hídrico (kg ha⁻¹);

Ym: rendimento máximo da cultura sob irrigação plena (kg ha⁻¹);

ETr: evapotranspiração real da cultura (mm);

ETm: evapotranspiração máxima da cultura, sob irrigação plena (mm);

3.4.4 Análise econômico-social

O valor bruto da produção (VBP) foi calculado considerando-se a produção efetiva de um ciclo de cultivo. Para avaliar a viabilidade econômica dos sistemas de produção sob diferentes estratégias de irrigação e manejo de bioinsumos procedeu-se à análise econômica tomando-se como base o indicador renda do agricultor. Esse indicador possibilita avaliar a viabilidade econômica em nível de unidade de produção e pode ser estimado pela equação 4 a seguir.

$$RA = VA - (J + S + I) \quad (3)$$

Em que:

RA: renda do agricultor, R\$;

VA: valor agregado, R\$ - diferença entre o Valor Bruto da Produção e os custos totais;

J: juros pagos aos bancos ou outro agente financeiro, R\$.

S: Custos com mão de obra e insumos, R\$;

I: impostos e tarifas pagas ao Estado, R\$.

Para compor o custo de capital, foram estimados os encargos financeiros (J) com base na linha de crédito adequada ao perfil do produtor. Já a remuneração da mão de obra (S) abrange tanto os trabalhadores permanentes, contratados sem prazo determinado e remunerados pelo salário-mínimo vigente, quanto os eventuais, cujo vínculo é temporário e encerra-se ao término da tarefa contratada.

Os tributos obrigatórios (I) correspondem ao valor anual do Imposto Territorial Rural (ITR), cobrado sobre qualquer imóvel de natureza rural situado fora da zona urbana, conforme previsto na Lei nº 9.393/1996.

Com esses elementos, desenvolveu-se um modelo de renda que permite calcular a superfície agrícola útil mínima (NRS) necessária para que a propriedade, e por consequência, a família produtora, assegure a própria reprodução social. Nesse cálculo, dois coeficientes são determinantes:

- Coeficiente b: capital fixo por pessoa, ou seja, o investimento em infraestrutura e máquinas

- dividido pelo número de trabalhadores familiares;
- Coeficiente a: contribuição marginal por hectare, que relaciona o acréscimo de renda gerado para cada hectare adicional cultivado.

Quanto maior for o capital fixo por trabalhador (b) e menor a renda incremental por hectare (a), maior deverá ser a área mínima por pessoa para garantir que cada membro da família atinja ao menos o salário-mínimo como rendimento. Essa abordagem segue a metodologia de Silva Neto (2005), adaptada para o contexto de sistemas de produção irrigada no semiárido.

Destaca-se que para a avaliação da renda do agricultor e da necessidade de reprodução social (NRS), considerou-se uma formação familiar padrão composta por cinco pessoas. Esse parâmetro foi adotado para estimar a renda líquida per capita e dimensionar a área mínima necessária à manutenção da unidade familiar na atividade agropecuária.

3.5 Análise dos dados

Os dados foram submetidos à análise de normalidade dos resíduos pelo teste Shapiro-Wilk e homogeneidade das variâncias pelo teste de Bartlett. Em seguida procedeu-se a análise de variância, pelo teste F, para cada variável estudada em cada ciclo de cultivo. Quando significativo por esse teste, comparou-se as médias pelo teste de Tukey ($p \leq 0.05$), empregando-se o software R versão 4.1.2 (R Core Team, 2024). Os gráficos foram elaborados no software SigmaPlot (versão 14.0).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variáveis de agronômicas e produtividade

A partir da análise de variância realizada para os parâmetros agronômicos da cultura (Tabela 2), verifica-se que, no primeiro ciclo, ampla maioria das variáveis estudadas não respondeu de forma significativa aos tratamentos aplicados, nem de forma isolada, nem a interação entre esses fatores, observando-se efeito significativo ($P < 0,05$) da interação entre as estratégias de irrigação empregados e os bioinsumos aplicados somente para a variável massa fresca da espiga sem palha (MFS). Verificou-se ainda efeito isolado significativo do fator irrigação nas variáveis produção por planta (PP) e produtividade (PROD).

De forma similar, no segundo ciclo, verificou-se que a interação dos fatores testados não influenciou de forma significativa as variáveis estudadas. Efeito isolado do fator irrigação foi verificado nas variáveis diâmetro da espiga (DE), número de grãos por fileira (NGF), massa fresca da espiga com palha (MFC), massa fresca da espiga sem palha (MFS), produção por planta (PP) e produtividade (PROD).

Tabela 2. Resumo da análise de variância pelo quadrado médio para diâmetro da espiga (DE), comprimento da espiga (CE), número de fileiras por espiga (NF), número de grãos por fileira (NGF), massa de 100 grãos (M100), massa de sabugo (MS), massa fresca da espiga com palha (MFC) e massa fresca da espiga sem palha (MFS), produção por planta (PP) e produtividade (PROD), da cultura do milho no primeiro (2023) e segundo ciclo (2024).

FV	DE	CE	NF	NGF	M100	MS	MFC	MFS	PP	PROD
Primeiro Ciclo de Cultivo - 2023										
Blocos	5,75 ^{ns}	5,44 ^{ns}	2,01 ^{ns}	20,35 ^{ns}	16,81 ^{ns}	16,76 ^{ns}	3305,76 ^{ns}	369,12 ^{ns}	221,24 ^{ns}	915276,8 ^{ns}
Ir	30,8 ^{ns}	8,90 ^{ns}	1,36 ^{ns}	66,08 ^{ns}	15,59 ^{ns}	64,09 ^{ns}	2445,13 ^{ns}	2539,35*	1571,82*	6656914,1*
Res. 1	10,24	4,47	1,35	26,59	8,94	22,89	3426,63	720,07	480,94	1777243,5
Bio	9,02 ^{ns}	4,10 ^{ns}	2,15 ^{ns}	6,68 ^{ns}	1,68 ^{ns}	8,43 ^{ns}	2563,68 ^{ns}	106,08 ^{ns}	387,02 ^{ns}	298959,2 ^{ns}
Ir x Bio	4,79 ^{ns}	5,26 ^{ns}	2,45 ^{ns}	20,09 ^{ns}	5,67 ^{ns}	9,81 ^{ns}	3028,13 ^{ns}	428,62*	529,55 ^{ns}	1167509,1 ^{ns}
Res. 2	5,02	3,76	1,7	10,94	6,26	7,74	1868,28	210,56	331,96	599408,7
Total	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV1(%)	7,71	15,1	8,02	21,07	11,28	25,36	47,4	25,28	24,99	25,69
CV2(%)	5,4	13,83	8,98	13,52	9,44	14,74	35	13,67	20,77	14,92
Segundo Ciclo de Cultivo - 2024										
Blocos	13,98*	5,60 ^{ns}	6,68*	60,81*	13,69 ^{ns}	40,16 ^{ns}	4221,59 ^{ns}	3618,58*	1621,42 ^{ns}	5836685,4 ^{ns}
Ir	18,31*	11,90 ^{ns}	0,46 ^{ns}	87,71**	13,28 ^{ns}	132,66 ^{ns}	6914,56*	5254,76*	3028,71*	10902086,5*
Res. 1	3,4	4,30	1,55	15,20	9,15	44,8	1394,52	989,07	567,65	2044094,4
Bio	7,29 ^{ns}	0,19 ^{ns}	1,92 ^{ns}	0,64 ^{ns}	1,85 ^{ns}	14,33 ^{ns}	1205,72 ^{ns}	582,82 ^{ns}	290,20 ^{ns}	1044288,7 ^{ns}
Ir x Bio	2,98 ^{ns}	1,35 ^{ns}	1,32 ^{ns}	5,66 ^{ns}	2,31 ^{ns}	16,56 ^{ns}	810,03 ^{ns}	479,98 ^{ns}	189,86 ^{ns}	683564,3 ^{ns}
Res. 2	5,14	1,66	2,13	10,81	6,55	23,77	901,19	605,62	366,17	1210387,9
Total	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV1(%)	4,19	12,64	8,75	12,85	10,88	27,25	27,18	26,45	24,87	24,88
CV2(%)	5,16	7,85	10,26	10,84	9,21	19,85	21,85	20,70	19,14	19,14

FV: Fontes de variação; GL: Graus de liberdade; BIO: Biosumo; *Significativo pelo teste F a 5%; ^{ns}: não significativo; CV: Coeficiente de variação; Ir: Irrigação; Bio: Bioinsumos; Res.: Resíduo.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Nos tratamentos submetidos a déficits hídricos controlados (IDR50%, IDCV50%, IDCF50% e IDCE50%), observou-se que as plantas inoculadas com os microrganismos apresentaram incrementos moderados em algumas variáveis de crescimento, ainda que nem todos os efeitos tenham sido estatisticamente significativos, conforme mencionado anteriormente. Esse comportamento sugere uma possível atuação dos bioinsumos na mitigação parcial do estresse hídrico, especialmente em condições de limitação moderada. Estudos prévios, como os de Vishnupradeep *et al.* (2022) e Armanhi *et al.* (2021), já haviam reportado efeitos positivos da inoculação bacteriana sobre o crescimento de plantas em ambientes de baixa disponibilidade hídrica, o que corrobora parcialmente os achados deste trabalho, embora os resultados aqui obtidos revelem uma resposta mais discreta do que a observada em algumas dessas pesquisas.

Outros autores em estudos sobre o efeito de microrganismos promotores de crescimento em condições de estresse, como Sousa *et al.* (2023), não observaram alterações significativas em características morfológicas da espiga, como comprimento e diâmetro, em resposta à aplicação de *Bacillus aryabhattachai*. No entanto, os autores destacaram ganhos relevantes no rendimento de grãos, sobretudo sob condições de déficit hídrico, evidenciando o potencial da bactéria em melhorar o desempenho da cultura mesmo sem modificar parâmetros biométricos clássicos. Mesmo padrão de comportamento foi observado por Kappes *et al.*, (2013) ao não observarem efeitos sobre a massa de grãos em resposta à aplicação de *A. brasiliense*; verificando-se, todavia, que os autores obtiveram ganhos no rendimento da cultura.

Observa-se na Figura 5, que sob as mesmas condições de irrigação, não houve influência significativa dos tratamentos relacionados ao manejo dos bioinsumos. Ainda na Figura 5, destaca-se que, quando se empregou a inoculação com *B. aryabhattachai* + *A. brasiliense* (V), obteve-se médias de MFS estatisticamente iguais para os tratamentos com estratégias de irrigação com déficit controlado, quando comparados ao tratamento de irrigação plena; porém com diferenças entre IP e IDR50%, sendo as maiores médias obtidas com IP. Além disso, a inoculação com *B. aryabhattachai* associado com a IP, resultou em maior MFS, em comparação a IDR50%. É relevante destacar que a avaliação da massa fresca da espiga sem palha é importante no manejo operacional de cultivos, especialmente em processos de colheita mecanizada; no campo, porém, o cultivo de híbridos com características que facilitam a colheita mecanizada, como boa retenção de palha ou estrutura robusta das espigas, pode mitigar esses problemas. Além disso, ajustes no maquinário e no manejo da colheita podem compensar parcialmente esses desafios, adequando estratégias às condições específicas do cultivo.

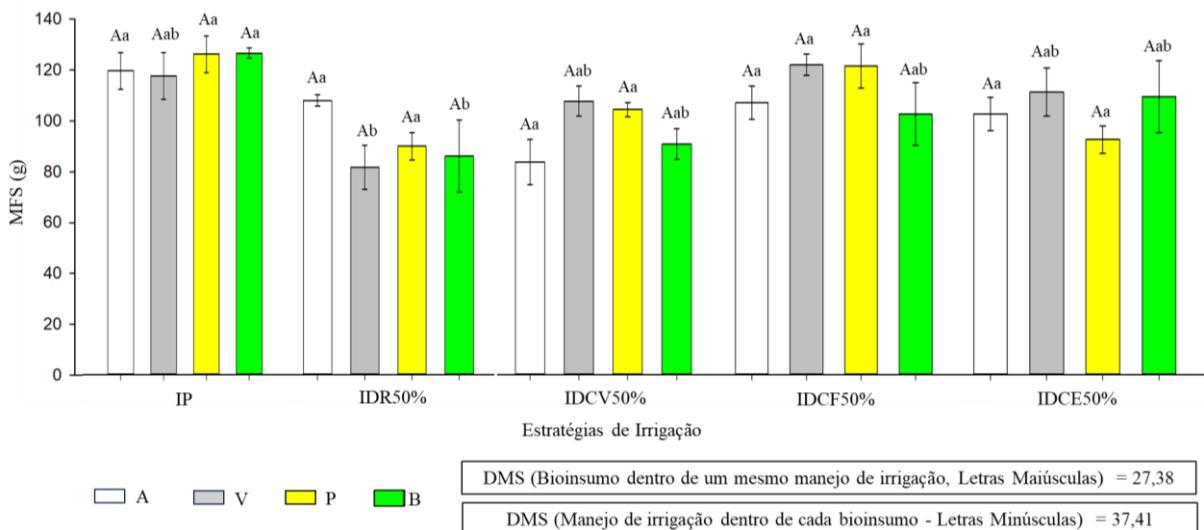


Figura 5. Massa fresca da espiga sem palha na cultura do milho sob diferentes estratégias de irrigação e bioinsumos promotores de crescimento.

Letras maiúsculas comparam médias de plantas com diferentes bioinsumos promotores de crescimento dentro de uma mesma estratégia de irrigação. Letra minúsculas comparam valores médios de plantas cultivadas sob diferentes estratégias de irrigação dentro de cada tipo de bioinsumo testado. DMS: Diferença Mínima Significativa; IP - Irrigação plena ao longo de todo o ciclo; IDR50% - Irrigação com déficit regular durante todo o ciclo; IDCV50% - Irrigação com déficit controlado na fase de crescimento vegetativo; IDCF50% - Irrigação com déficit controlado na fase de florescimento e formação dos grãos; IDCE50% - Irrigação com déficit controlado na fase de enchimento de grão. A - Inoculação com *B. aryabhattachai*; V - inoculação com *B. aryabhattachai* + *A. brasiliense*; P - controle positivo, com adição de nitrogênio mineral (ureia - 45% de N - na dose recomendada conforme a análise do solo), sem a aplicação de bioinsumos; B - controle negativo, sem uso de nitrogênio mineral ou inoculação.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Conforme observado na Figura 5, a combinação de *B. aryabhattachai* e *A. brasiliense* mostrou-se eficaz na mitigação dos efeitos do déficit hídrico na cultura do milho. Esse efeito positivo está alinhado com os achados de Vishnupradeep *et al.* (2022), Armanhi *et al.* (2021) e Cohen *et al.* (2015), que demonstraram que bactérias promotoras de crescimento, como *A. brasiliense*, são capazes de aumentar a tolerância das plantas ao estresse hídrico por meio da produção de fitormônios e exopolissacarídeos, favorecendo a absorção de água e nutrientes e promovendo o desenvolvimento do sistema radicular.

Adicionalmente, a literatura destaca que *Bacillus* spp., incluindo *B. aryabhattachai*, têm mostrado eficiência em promover o crescimento vegetal sob condições de estresse hídrico. Estudos como os de Cassán *et al.* (2014) e Sousa *et al.* (2023) reforçam que a inoculação com essas bactérias pode aumentar os níveis de ácido abscísico (ABA) nas plantas, um hormônio crucial para a resposta ao estresse hídrico. Esse aumento de ABA ajuda a regular a abertura estomática, diminuindo a perda de água por transpiração e melhorando a eficiência no uso da água pela planta e outros aspectos do desenvolvimento da cultura.

Outro ponto relevante nos resultados deste estudo foi a resposta mais expressiva da cultura do milho ao tratamento com a coinoculação de *B. aryabhattachai* e *A. brasiliense*,

especialmente sob condições de déficit hídrico moderado. Essa resposta pode estar associada à ação sinérgica entre os dois microrganismos, conforme já descrito por Lopes et al. (2019), Ashry et al. (2022) e Benjelloun et al. (2021), que relataram que a combinação de bactérias promotoras de crescimento pode intensificar a produção de fitormônios e o estímulo ao crescimento radicular. No presente estudo, essa sinergia se traduziu em médias de MFS sob condições de déficit controlado estatisticamente iguais às obtidas sob irrigação plena, sugerindo um efeito complementar entre os mecanismos fisiológicos ativados por ambas as bactérias. Cassán e Diaz-Zorita (2016) também destacam que tais associações favorecem a solubilização de nutrientes, o que pode ter contribuído para o melhor desempenho observado, mesmo sob disponibilidade hídrica reduzida.

No segundo ciclo não se verificou efeito significativo da interação dos fatores testados sobre a produção da cultura do milho (Tabela 2). Todavia as variáveis de crescimento, diâmetro da espiga (DE), número de grãos por fileira (NGF), massa fresca da espiga com palha (MFC) e massa fresca da espiga sem palha (MFS), foram influenciadas de forma isolada pelo fator irrigação.

Conforme pode-se observar na Figura 6, a estratégia de irrigação conforme IDCV50% proporcionou a maior média para a variável diâmetro da espiga, em termos absolutos, sendo esta estatisticamente igual às estratégias IP, IDR50% e IDCF50%, indicando a possibilidade de cultivo da cultura com economia de água, sem comprometer a formação da espiga.

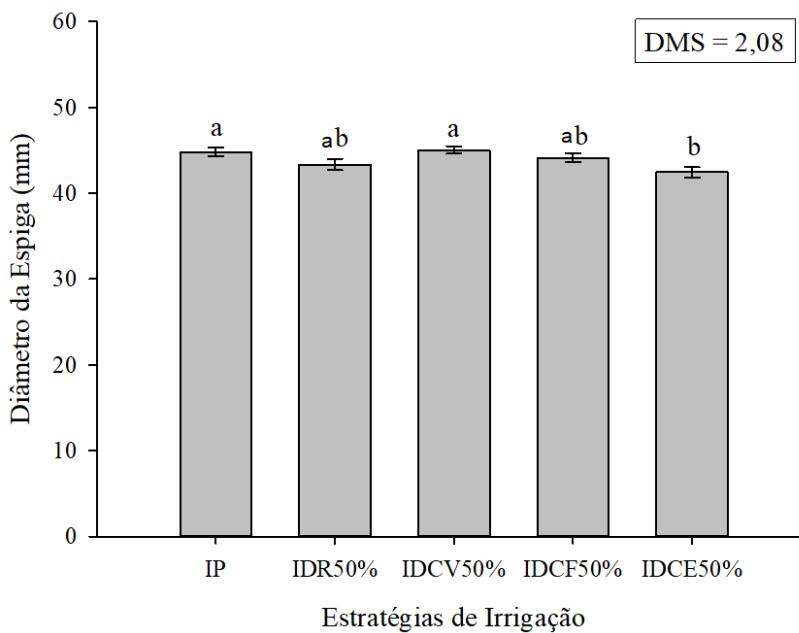


Figura 6. Diâmetro da espiga de milho sob diferentes estratégias de irrigação no segundo ciclo (2024).

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). DMS: Diferença Mínima Significativa; IP - Irrigação plena ao longo de todo o ciclo; IDR50% - Irrigação com déficit regular durante todo o ciclo; IDCV50% - Irrigação com déficit controlado na fase de crescimento vegetativo; IDCF50% - Irrigação com déficit controlado na fase de florescimento e formação dos grãos; IDCE50% - Irrigação com déficit controlado na fase de enchimento de grão.

Fonte: Elaborado pelo Autor

O comportamento da variável diâmetro da espiga apresentado na Figura 6 está em consonância com estudos que indicam que o milho possui certa plasticidade fisiológica para tolerar déficits hídricos durante a fase vegetativa ou fases menos críticas do desenvolvimento da cultura (BERGAMASCHI *et al.*, 2004; FERRARI *et al.*, 2015). Similarmente, Silva *et al.* (2021) ao avaliarem os parâmetros produtivos do milho sob déficit hídrico em diferentes fases fenológicas no semiárido brasileiro, observaram que plantas submetidas ao déficit hídrico na fase vegetativa não tiveram reduções significativas no número de grãos por espiga, enquanto déficits nas fases de pendoamento e floração resultaram em menor produtividade.

Além da estabilidade do diâmetro da espiga nos tratamentos com déficit hídrico na fase vegetativa, conforme apresentado na Figura 6, é relevante considerar que essa variável pode refletir não apenas a tolerância da planta ao estresse, mas também o efeito acumulado de adaptações fisiológicas, como maior desenvolvimento radicular ou ajustes na condutância estomática. Tais mecanismos, frequentemente ativados por bactérias promotoras de crescimento, como *A. brasiliense*, podem minimizar perdas estruturais em órgãos reprodutivos, mesmo sob restrição hídrica (TAIZ *et al.*, 2017). Assim, a manutenção do diâmetro da espiga

pode indicar não apenas resistência passiva ao estresse, mas também uma resposta ativa mediada por ajustes morfofisiológicos.

O número de grãos por fileira também respondeu de forma significativa e isolada ao fator irrigação. Na Figura 7 a seguir consta a comparação das médias para essa variável em função da estratégia de irrigação empregada. O número de grãos por fileira constitui-se em um componente importante na caracterização do desenvolvimento do milho, influenciando diretamente o rendimento final da cultura.

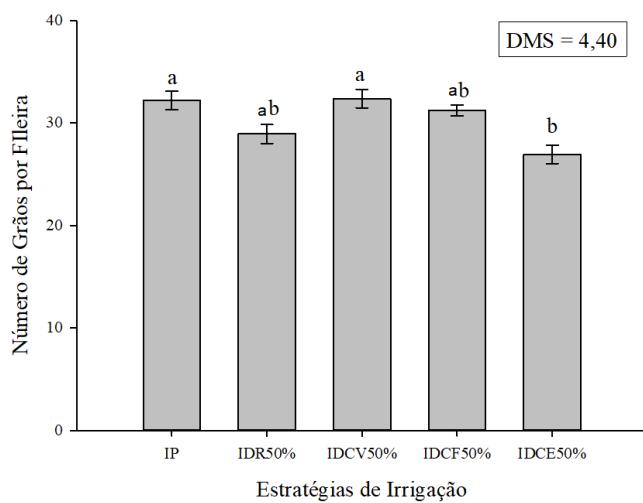


Figura 7. Número de grãos por fileira (NGF) na cultura do milho sob diferentes estratégias de irrigação no segundo ciclo (2024).

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). DMS: Diferença Mínima Significativa; IP - Irrigação plena ao longo de todo o ciclo; IDR50% - Irrigação com déficit regular durante todo o ciclo; IDCV50% - Irrigação com déficit controlado na fase de crescimento vegetativo; IDC50% - Irrigação com déficit controlado na fase de florescimento e formação dos grãos; IDCE50% - Irrigação com déficit controlado na fase de enchimento de grão.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Conforme a Figura 7 tem-se que a estratégia com déficit hídrico na fase de enchimento de grãos apresentou uma redução significativa no número de grãos por fileira em comparação com a irrigação plena. Essa fase é crítica não só para a expressão dessa variável como também para o rendimento final da cultura, de modo que o déficit hídrico nesse período pode comprometer a formação de grãos.

Conforme apresentado anteriormente, observou-se que o déficit hídrico aplicado nas fases de pendoamento e floração resultou em expressiva redução no número de grãos por espiga (Figura 7), o que refletiu negativamente na produtividade final da cultura. Esse comportamento reforça o caráter crítico dessas fases para a formação reprodutiva do milho,

uma vez que o estresse hídrico nesse período compromete diretamente a fecundação e o enchimento inicial dos grãos. Resultados semelhantes foram relatados por Silva *et al.* (2021) e Bergamaschi *et al.* (2004), os quais identificaram sensível queda no rendimento da cultura quando submetida à restrição hídrica no intervalo entre o pendoamento e o início da granação. Esses achados demonstram que, mesmo diante do uso de bioinsumos, o suprimento hídrico adequado durante esse intervalo permanece determinante para assegurar a formação dos grãos e o desempenho agronômico da cultura.

Nas Figuras 8A e 8B a seguir pode-se verificar, respectivamente, o comportamento das variáveis massa fresca da espiga com palha (MFC) e massa fresca da espiga sem palha (MFS) em função das diferentes estratégias de irrigação estudadas.

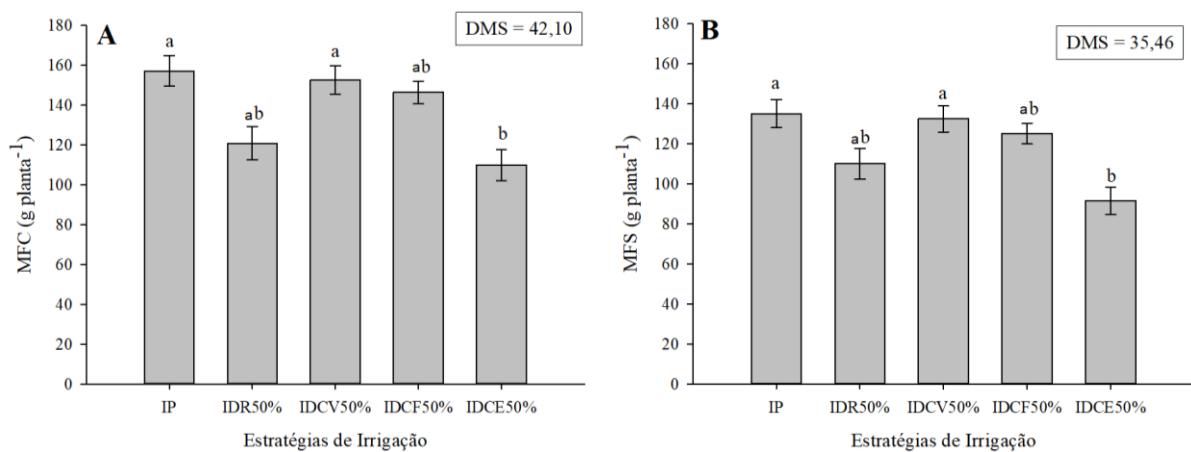


Figura 8. Massa fresca da espiga com palha (A) e sem palha (B) de milho sob diferentes estratégias de irrigação no segundo ciclo (2024).

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). DMS: Diferença Mínima Significativa; IP - Irrigação plena ao longo de todo o ciclo; IDR50% - Irrigação com déficit regular durante todo o ciclo; IDCV50% - Irrigação com déficit controlado na fase de crescimento vegetativo; IDCF50% - Irrigação com déficit controlado na fase de florescimento e formação dos grãos; IDCE50% - Irrigação com déficit controlado na fase de enchimento de grão.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Figura 8A, o tratamento com irrigação plena (IP) proporcionou a maior média de MFC, enquanto o tratamento submetido a déficit hídrico na fase de enchimento de grãos (IDCE50%) apresentou redução significativa na massa fresca das espigas com palha. O tratamento com déficit hídrico contínuo também apresentou redução expressiva da MFC, todavia estatisticamente igual a IP e às estratégias conforme IDCV50% e IDCF50%, exibindo valores intermediários de MFC, sugerindo que a restrição hídrica em fases específicas pode ser aplicada sem comprometer drasticamente a expressão dessa variável.

Para MFS (Figura 8B) verificou-se padrão de comportamento similar à MFC em função das estratégias de irrigação estudadas, observando-se média superior para a estratégia

conforme IP, todavia estatisticamente igual a IDR50%, IDCV50% e IDCF50%; e redução significativa na expressão dessa variável em IDCE50%, em comparação a IP.

A massa de espiga, tanto com quanto sem palha, são importantes indicadores dos níveis de desempenho da cultura do milho. De modo geral, os resultados verificados para MFC e MFS alinharam-se à tendência observadas para as demais variáveis significativas. Influência significativa da irrigação com diferentes níveis de déficit podem ser verificados também em Silva *et al.* (2021) e Bastos *et al.* (2017).

Com relação à produção, conforme a Figura 9A, verificou-se redução de 26% na variável PP no tratamento IDR50% (74,54 g planta⁻¹), em comparação ao IP, que proporcionou uma média de 100,73 g planta⁻¹ no primeiro ciclo. A média verificada para o tratamento IP foi estatisticamente igual às médias verificadas em IDCV50% (84,62 g planta⁻¹), IDCF50% (93,58 g planta⁻¹) e em IDCE50% (85,23 g planta⁻¹) (Figura 5A). Conforme a figura, a redução da lâmina de irrigação em fases específicas do desenvolvimento da cultura não reduziu de forma significativa a produção por planta, especificamente redução de 50% na lâmina aplicada nas fases de crescimento vegetativo, florescimento e formação dos grãos e enchimento dos grãos, indicando a possibilidade de economia de água sem comprometer a produção.

É consenso que o déficit hídrico ocasiona a redução do potencial hídrico do solo e, consequentemente limita a disponibilidade da solução do solo, aspecto limitante para a absorção de nutrientes e para os processos fisiológicos (SOUZA *et al.*, 2023). Esses efeitos negativos que influenciam diretamente a expressão das plantas, variando de acordo com o tempo de exposição ao déficit, fatores edáficos e fase em que o estresse hídrico é aplicado (GOES *et al.*, 2021).

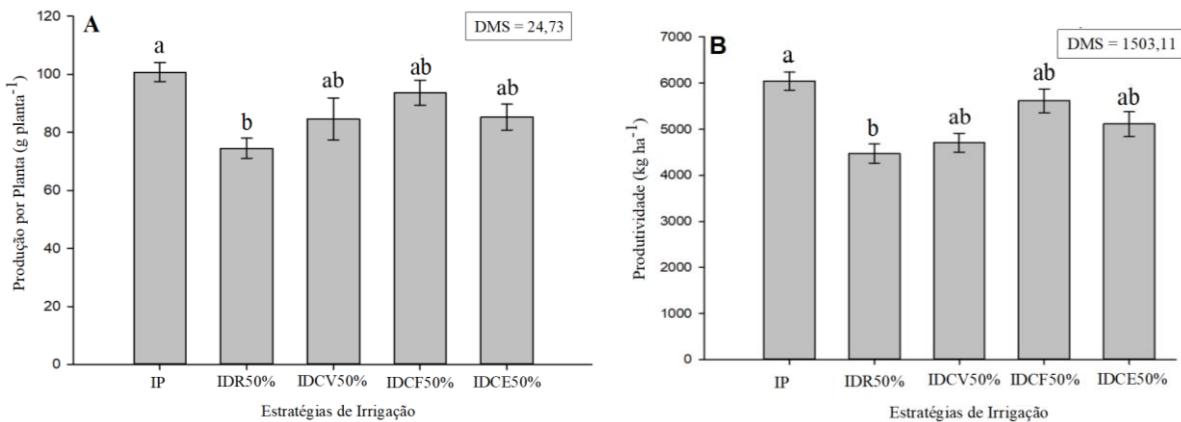


Figura 9. Produção por planta (A) e produtividade (B) de milho sob diferentes estratégias de irrigação no primeiro ciclo (2023).

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). DMS: Diferença Mínima Significativa; IP - Irrigação plena ao longo de todo o ciclo; IDR50% - Irrigação com déficit regular durante todo o ciclo; IDCV50% - Irrigação com déficit controlado na fase de crescimento vegetativo; IDC50% - Irrigação com déficit controlado na fase de florescimento e formação dos grãos; IDCE50% - Irrigação com déficit controlado na fase de enchimento de grão.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Para a variável PROD no primeiro ciclo, verificou-se o mesmo padrão de comportamento observado para a variável PP (Figura 5B). De modo análogo ao abordado para a variável anterior, é relevante destacar a possibilidade de economia de água, mantendo os níveis de produtividade. Essa inferência pode ser constatada no tratamento com IP (6043,72 kg ha⁻¹) que é estatisticamente igual às médias verificadas em IDCV50%, IDC50% e em IDCE50% (4705,78; 5615,00 e 5114,12 kg ha⁻¹, respectivamente). Diferença estatística foi observada entre as médias dos tratamentos IP (6043,72 kg ha⁻¹) e IDR50% (4472,68 kg ha⁻¹), verificando-se uma redução de 26% na expressão desse parâmetro.

No segundo ciclo de produção, verificou-se comportamento parcialmente similar das variáveis de produção da cultura do milho (Figura 10). De acordo com as Figuras 10A e 10B, as variáveis produção por planta e produtividade foram significativamente influenciadas pelas estratégias de irrigação. O tratamento IDCV50% resultou nas maiores médias em ambas variáveis (107,76 g planta⁻¹ e 6465,80 kg ha⁻¹), enquanto IDCE50% apresentou reduções expressivas em comparação à IP. Esse resultado alinha-se à importância da disponibilidade hídrica para o enchimento de grãos, fase em que o déficit hídrico pode comprometer biomassa, conforme abordado anteriormente.

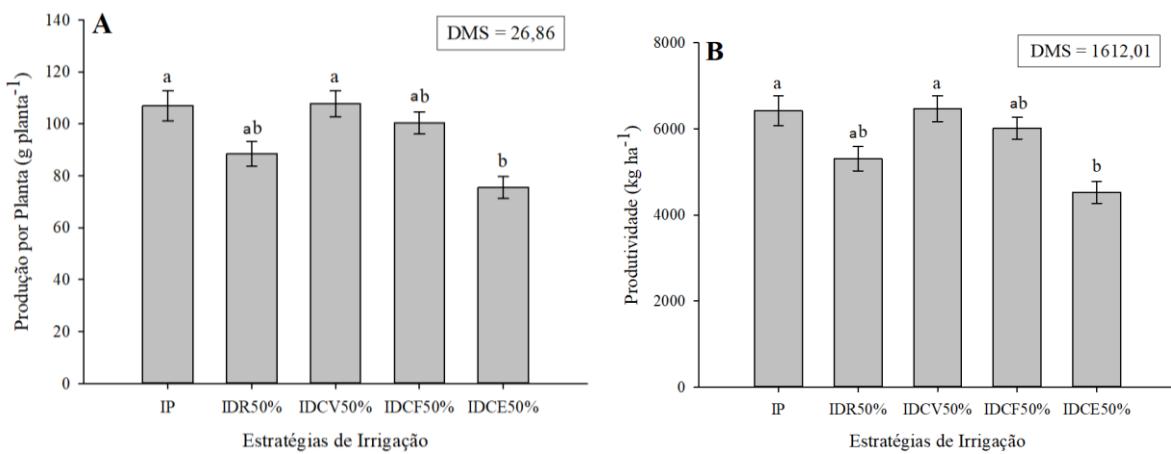


Figura 10. Produção por planta (A) e produtividade (B) de milho sob diferentes estratégias de irrigação no segundo ciclo (2024).

Medias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). DMS: Diferença Mínima Significativa; IP - Irrigação plena ao longo de todo o ciclo; IDR50% - Irrigação com déficit regular durante todo o ciclo; IDCV50% - Irrigação com déficit controlado na fase de crescimento vegetativo; IDCDF50% - Irrigação com déficit controlado na fase de florescimento e formação dos grãos; IDCE50% - Irrigação com déficit controlado na fase de enchimento de grão.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os resultados verificados no presente estudo são corroborados por diversos estudos na literatura. Bernini *et al.* (2020) destacam que a limitação na disponibilidade de água durante o período de pré-florescimento pode afetar o desenvolvimento das estruturas vegetativas, mas não necessariamente impacta a produtividade final quando o déficit hídrico é controlado. No referido estudo, os autores concluíram que, em algumas condições, a produtividade de híbridos específicos pode ser mantida mesmo sob estresse hídrico moderado, destacando a importância da escolha de híbridos adaptados.

Araújo *et al.* (2022) acrescentam que a produtividade de milho no semiárido brasileiro, onde o estresse hídrico é comum, pode ser mantida através de técnicas de manejos eficientes. Embora o clima e a irregularidade das chuvas sejam desafios, a utilização de práticas agrícolas adequadas, como a seleção de cultivares tolerantes e estratégia de irrigação eficiente, pode resultar em produtividades comparáveis às obtidas em condições de irrigação plena (NOGUEIRA *et al.*, 2023). Assim, os resultados do estudo em questão corroboram com a literatura existente, indicando que o déficit hídrico controlado durante fases críticas do desenvolvimento do milho pode não comprometer significativamente a produtividade final.

Em relação a variável produtividade da água, no primeiro ciclo, houve interação significativa para os fatores estratégias de irrigação e bioinssumos promotores de crescimento ($QM = 0,30248$) com $P \leq 0,01$. Em condições de deficit regular (IDR50%), a inoculação com *B. aryabhattai* proporcionou um aumento de 21,3% na produtividade da água ($3,61 \text{ kg m}^{-3}$)

em comparação ao controle sem inoculação com bioinsumo ou aplicação de ureia ($2,84 \text{ kg m}^{-3}$) (Figura 11).

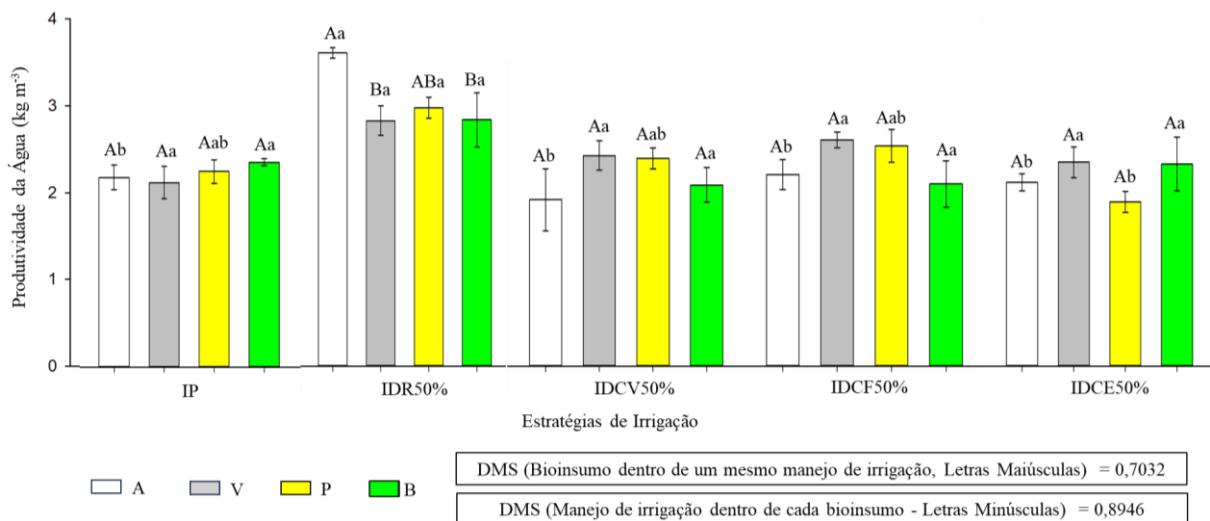


Figura 11. Produtividade da água na cultura do milho sob diferentes estratégias de irrigação e bioinsumos promotores de crescimento no primeiro ciclo (2023).

Letras maiúsculas comparam médias de plantas com diferentes bioinsumos promotores de crescimento dentro de uma mesma estratégia de irrigação. Letra minúsculas comparam valores médios de plantas cultivadas sob diferentes estratégias de irrigação dentro de cada tipo de bioinsumo testado. DMS: Diferença Mínima Significativa; IP - Irrigação plena ao longo de todo o ciclo; IDR50% - Irrigação com déficit regular durante todo o ciclo; IDCV50% - Irrigação com déficit controlado na fase de crescimento vegetativo; IDCF50% - Irrigação com déficit controlado na fase de florescimento e formação dos grãos; IDCE50% - Irrigação com déficit controlado na fase de enchimento de grão. A - Inoculação com *B. aryabhattai*; V - inoculação com *B. aryabhattai* + *A. brasiliense*; P - controle positivo, com adição de nitrogênio mineral (ureia - 45% de N - na dose recomendada conforme a análise do solo), sem a aplicação de bioinsumos; B - controle negativo, sem uso de nitrogênio mineral ou inoculação.

Fonte: Elaborado pelo Autor

A inoculação com *B. aryabhattai*, quando empregada na estratégia de irrigação IDR50%, proporcionou a maior média para essa variável ($3,61 \text{ kg m}^{-3}$), estatisticamente superior às médias verificadas para esse bioinsumo em outras estratégias estudadas (Figura 11). Esse resultado indica interação positiva no emprego de *B. aryabhattai* com condições de déficit hídrico. Todavia, considerando a natureza dos dados, é relevante destacar que esse resultado também é ocasionado pela significativa redução no volume de água aplicado nessa estratégia, o que contribui para o aumento da eficiência do uso da água, uma vez que esse parâmetro é sensível tanto à produção quanto ao volume de água fornecido (DOORENBOS; KASSAM, 1979).

Esse comportamento reforça a ideia de que a atuação positiva de *B. aryabhattai* é mais evidente sob condições de déficit hídrico acentuado, como demonstrado na estratégia IDR50%. A resposta mais pronunciada nessas condições pode ser atribuída à capacidade de *B. aryabhattai* de promover mecanismos de tolerância ao estresse hídrico, como o aumento da eficiência no uso da água e a regulação de hormônios vegetais relacionados ao crescimento e

à adaptação ao estresse (MACHADO *et al.*, 2020). Além disso, em situações de disponibilidade reduzida de água, a influência positiva dos bioinsumos tende a se manifestar de maneira mais clara, uma vez que os efeitos benéficos desses microrganismos sobre a absorção de nutrientes, desenvolvimento radicular e eficiência fotossintética tornam-se mais críticos para o desempenho da cultura. Portanto, o uso de *B. aryabhattai* em condições de déficit hídrico extremo se mostra promissor, especialmente por favorecer o incremento na produtividade da água, um parâmetro fundamental para a viabilidade e sustentabilidade da produção agrícola em regiões de baixa disponibilidade hídrica (VISHNUPRADEEP *et al.*, 2022).

Diversos fatores podem explicar essa ação positiva do emprego de *B. aryabhattai* em elevar a produtividade da água na cultura do milho, podendo-se atribuir à ação benéfica dessas bactérias na zona rizosférica, que promovem o desenvolvimento radicular, aumentam a disponibilidade de nutrientes e potencializam a produção de fitohormônios, como ácido abscísico, giberelinas, citocininas e auxinas (NOVO *et al.*, 2018).

Pesquisas indicam, de forma adicional, que o uso de inoculantes microbianos pode ser uma estratégia eficiente para a agricultura em regiões semiáridas, onde a disponibilidade de água, em termos de quantidade e qualidade, é limitada. Sousa *et al.* (2021), por exemplo, confirmaram que a utilização de *B. aryabhattai* não só atenua os impactos negativos do déficit hídrico, mas também promove o crescimento e desenvolvimento das plantas de milho, resultando em maior eficiência do uso da água e níveis de produtividade.

Portanto, a inclusão de *B. aryabhattai* no manejo agrícola pode ser uma solução promissora para enfrentar os desafios impostos pelo déficit hídrico na cultura do milho. A manutenção da umidade do solo e o aprimoramento do sistema radicular das plantas são alguns dos mecanismos pelos quais essas bactérias promovem maior resiliência das plantas ao estresse hídrico. A pesquisa contínua e a aplicação prática dessas biotecnologias são fatores preponderantes para garantir a sustentabilidade e a produtividade das culturas em condições adversas, como evidenciado pelos trabalhos de Kavamura *et al.* (2013) e Oliveira *et al.* (2020).

Não obstante os benefícios potenciais referentes ao emprego de bioinsumos promotores de crescimento e sua interação com estratégias de irrigação com déficit hídrico descritos nos parágrafos anteriores, no segundo ciclo não se verificou influência dos fatores testados e nem da interação destes sobre a produtividade da água. De modo geral, observou-se um comportamento numérico levemente superior nas médias da produtividade da água nos tratamentos com uso de bioinsumos, principalmente sob condições de déficit hídrico. No entanto, tais variações não foram estatisticamente significativas, o que limita a possibilidade

de conclusões definitivas sobre os efeitos dos fatores testados nesse segundo ciclo.

Essa ausência de resposta significativa à inoculação dos bioinsumos no segundo ciclo pode estar relacionada a diferentes fatores, um deles é a variação nas condições ambientais entre os ciclos, especialmente no que se refere à temperatura, radiação solar e umidade do solo, que influenciam diretamente a colonização e a atividade dos microrganismos no rizossolo. Além disso, é possível que a composição microbiológica natural do solo no segundo ciclo tenha interferido na eficácia da bactéria aplicada, dificultando sua ação promotora de crescimento. Fatores como acúmulo de resíduos culturais ou alterações nas propriedades físico-químicas do solo, devido ao manejo anterior, também podem ter modulado a resposta fisiológica das plantas ao bioinsumo, tornando menos evidente seu efeito sob déficit hídrico.

4.2 Variáveis fisiológicas

Com relação ao índice relativo de clorofila (Índice SPAD), não se verificou, no primeiro ciclo, efeito significativo dos fatores testados e nem da interação entre esses fatores (Tabela 3).

Tabela 3. Resumo da análise de variância pelo quadrado médio para o Índice SPAD em três avaliações, no primeiro ciclo (2023).

FV	SPAD - AV1	SPAD - AV2	SPAD - AV3
Blocos	48,31 ^{ns}	9,92 ^{ns}	15,49 ^{ns}
Irrigação (Ir)	4,24 ^{ns}	37,52 ^{ns}	34,28 ^{ns}
Resíduo 1	18,36	47,2	73,39
Bioinsumo (Bio)	46,13 ^{ns}	10,57 ^{ns}	14,32 ^{ns}
Ir x Bio	16,05 ^{ns}	19,05 ^{ns}	39,90 ^{ns}
Resíduo 2	14,77	40,22	42,92
Total	-	-	-
CV 1 (%)	13,27	19,60	26,51
CV2 (%)	11,27	18,09	20,27

FV: Fontes de variação; GL: Graus de liberdade; *Significativo pelo teste F a 5%; ^{ns}: não significativo; CV: Coeficiente de variação.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Em diversas culturas agrícolas, além do milho (NASCIMENTO *et al.*, 2015), tem-se observado reduções na expressão dessa variável em função do déficit hídrico, como em Silva *et al.* (2013), que verificaram menores valores de índice SPAD quando a cultura foi submetida a condições de estresse, notadamente em genótipos mais susceptíveis ao déficit hídrico. Contrapondo-se a essa tendência, no presente estudo não se verificou diferença

estatística para esse parâmetro nas diferentes estratégias de irrigação aplicadas. Tal comportamento pode ter sido condicionado pela ação dos bioinsumos promotores de crescimento, cujos benefícios descritos anteriormente, podem possibilitar adequada absorção de nutrientes mesmo em condições de déficits. No segundo ciclo de cultivo, por razões técnicas (indisponibilidade de equipamento), o índice relativo de clorofila não foi estimado.

Na Tabela 4 a seguir pode-se verificar o resumo da análise de variância para as variáveis fisiológicas (A, E, gs, Ci e A/Ci), nas três avaliações realizadas no primeiro ciclo (50, 64 e 79 DAS) e nas duas avaliações realizadas no segundo ciclo (55 e 72 DAS).

Tabela 4. Resumo da análise de variância pelo quadrado médio para A, E, gs, Ci e A/Ci em três avaliações no primeiro ciclo e duas avaliações no segundo ciclo.

Variável	Quadrado Médio			CV (%)
	Ir	Bio	Ir x Bio	
Primeiro Ciclo de Cultivo - 2023				
A	50 DAS	65,62 ^{ns}	37,13 ^{ns}	26,38 ^{ns} 21,37
	64 DAS	85,22 ^{ns}	13,51 ^{ns}	24,31 ^{ns} 32,32
	79 DAS	13,596 ^{ns}	2,387 ^{ns}	23,145 ^{ns} 15,03
E	50 DAS	2,745 ^{ns}	0,386 ^{ns}	0,305 ^{ns} 27,61
	64 DAS	5,082*	8,038**	2,916 ^{ns} 18,25
	79 DAS	1,512 ^{ns}	0,274 ^{ns}	0,599 ^{ns} 21,56
gs	50 DAS	2,175 ^{ns}	0,705 ^{ns}	0,366 ^{ns} 19,29
	64 DAS	0,2185**	0,0896**	0,0242 ^{ns} 21,70
	79 DAS	18,45 ^{ns}	0,5487 ^{ns}	0,7657 ^{ns} 12,18
Ci	50 DAS	435,5 ^{ns}	748,5 ^{ns}	382,7 ^{ns} 11,11
	64 DAS	4363**	788 ^{ns}	2061* 7,33
	79 DAS	10638 ^{ns}	841 ^{ns}	1798 ^{ns} 14,79
A/Ci	50 DAS	0,0006 ^{ns}	0,0008 ^{ns}	0,0003 ^{ns} 22,71
	64 DAS	0,0013 ^{ns}	0,0002 ^{ns}	0,0011 ^{ns} 25,83
	79 DAS	0,0003 ^{ns}	0,0002 ^{ns}	0,0007 ^{ns} 26,54
Segundo Ciclo de Cultivo - 2024				
A	55 DAS	44,17 ^{ns}	57,21 ^{ns}	61,13 ^{ns} 25,93
	72 DAS	11,83 ^{ns}	112,33 ^{ns}	123,26 ^{ns} 27,20
E	55 DAS	2,037 ^{ns}	1,087 ^{ns}	0,399 ^{ns} 25,80
	72 DAS	4,192 ^{ns}	2,036 ^{ns}	2,442 ^{ns} 22,47
gs	55 DAS	0,0095 ^{ns}	0,0043 ^{ns}	0,0024 ^{ns} 22,38
	72 DAS	0,0151 ^{ns}	0,0240 ^{ns}	0,0150 ^{ns} 20,65
Ci	55 DAS	1680 ^{ns}	1823 ^{ns}	3345 ^{ns} 17,64
	72 DAS	1412 ^{ns}	601 ^{ns}	4431* 18,96
A/Ci	55 DAS	0,146 ^{ns}	0,165 ^{ns}	0,1111 ^{ns} 21,71
	72 DAS	0,0113 ^{ns}	0,0114 ^{ns}	0,0384* 17,52

FV: Fontes de variação; *Significativo pelo teste F a 5%; **Significativo pelo teste F a 1%; ^{ns}: não significativo; CV: Coeficiente de variação; Ir: Irrigação; Bio: Bioinsumos.

Fonte: Elaborado pelo Autor

É relevante destacar que a diferença no número de avaliações e momento da coleta entre os ciclos se deu por questões técnicas e disponibilidade de recursos, impossibilitando a realização de três coletas no segundo ciclo e a realização destas com o mesmo número de dias após a semeadura.

Conforme pode-se observar na Tabela 4, no primeiro ciclo, observou-se que as variáveis fisiológicas relacionadas às trocas gasosas apresentaram respostas distintas aos tratamentos testados ao longo das três avaliações realizadas (50, 64 e 79 dias após a semeadura - DAS). Na avaliação aos 50 DAS nenhum dos fatores (irrigação, bioinsumo ou a interação entre ambos) influenciou significativamente qualquer das variáveis analisadas, indicando que, nesse estágio inicial, os efeitos fisiológicos dos bioinsumos e das estratégias hídricas não haviam se manifestado de forma estatisticamente detectável pelos testes aplicados.

Entretanto, na avaliação aos 64 DAS, diversos efeitos significativos foram verificados. A taxa de transpiração (E) foi influenciada significativamente tanto pelo fator irrigação (1%) quanto pelo bioinsumo (5%), sugerindo que, nesse estágio de desenvolvimento, os microrganismos promotores de crescimento e o regime hídrico imposto impactaram o balanço hídrico da planta. A condutância estomática (gs) também apresentou significância estatística para ambos os fatores isolados ao nível de 1%, o que reforça a ação dos tratamentos sobre a regulação estomática.

A concentração interna de CO₂ (Ci) também apresentou sensibilidade aos tratamentos na avaliação aos 64 DAS, apresentando significância para o fator irrigação e para a interação entre os fatores testados ao nível de 1%. Tal comportamento reforça a influência conjunta dos fatores hídricos e biológicos sobre o funcionamento estomático e a assimilação de carbono, sugerindo tanto ajustes na abertura estomática quanto na eficiência bioquímica da fotossíntese. Por outro lado, a razão A/Ci, que representa uma estimativa da eficiência de carboxilação, não apresentou diferenças significativas nesta data, indicando estabilidade relativa entre a taxa de assimilação de CO₂ e sua disponibilidade interna.

No segundo ciclo, não foram observadas diferenças estatísticas significativas para nenhuma das variáveis fisiológicas analisadas na primeira avaliação (55 DAS), seja para os efeitos principais de irrigação e bioinsumo, seja para a interação entre eles. Esse comportamento sugere que, nesse estágio intermediário de desenvolvimento da cultura, as respostas fisiológicas das plantas ainda não haviam sido suficientemente moduladas pelos tratamentos aplicados, ou que os efeitos estavam sendo suavizados por condições ambientais mais favoráveis à época da coleta.

Entretanto, na segunda avaliação (72 DAS), observou-se efeito significativo da interação entre irrigação e bioinsumo para duas variáveis fisiológicas: concentração interna de CO₂ (Ci) e relação A/Ci, ambas ao nível de 5% de significância. O comportamento da Ci reflete modificações no equilíbrio entre a abertura estomática e a capacidade bioquímica da planta em assimilar o carbono interno, indicando que os tratamentos em combinação alteraram a dinâmica de assimilação e/ou retenção de CO₂ na folha. Já a relação A/Ci, amplamente utilizada como um indicador da eficiência instantânea de carboxilação, também foi sensível à interação dos fatores, apontando que os tratamentos conjuntos afetaram a eficiência fotossintética da cultura.

Dessa forma, os resultados do segundo ciclo complementam as observações do primeiro, sugerindo que os efeitos fisiológicos de bioinsumos associados às estratégias hídricas são modulados pelo estádio fenológico da planta e pelas condições ambientais ao longo do ciclo, sendo mais expressivos em fases críticas do desenvolvimento.

Conforme observado na Tabela 4, no primeiro ciclo, o fator irrigação influenciou de forma isolada as variáveis E e gs, aos 64 DAS. Na Figura 12 a seguir pode-se observar o comportamento dessas variáveis em função das estratégias de irrigação estudadas.

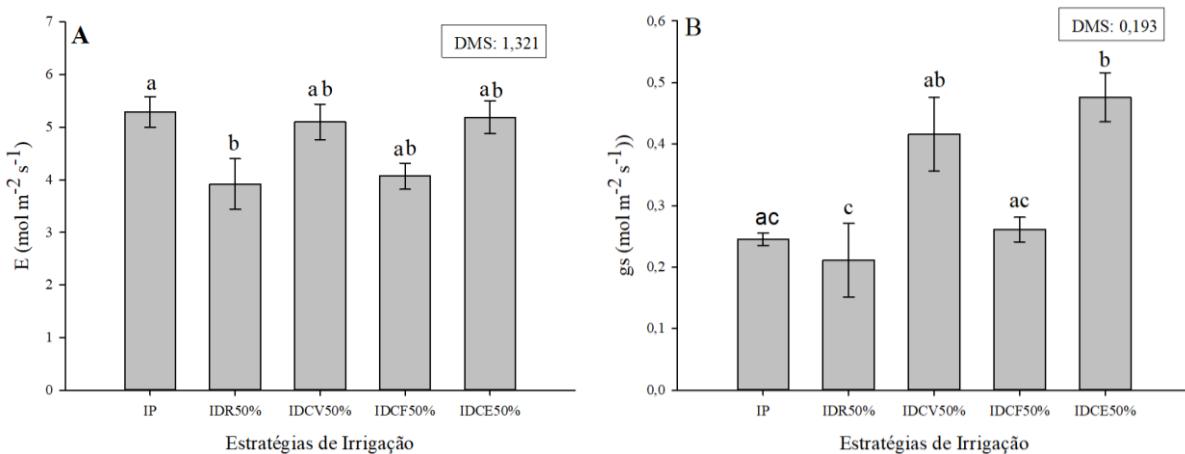


Figura 12. Transpiração (A) e condutância estomática (B) do milho sob diferentes estratégias de irrigação no primeiro ciclo de cultivo aos 64 DAS (2023).

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). IP - Irrigação plena ao longo de todo o ciclo; IDR50% - Irrigação com déficit regular durante todo o ciclo; IDCV50% - Irrigação com déficit controlado na fase de crescimento vegetativo; IDC50% - Irrigação com déficit controlado na fase de florescimento e formação dos grãos; IDCE50% - Irrigação com déficit controlado na fase de enchimento de grão.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Em relação à taxa de transpiração (Figura 12A), o tratamento com irrigação plena apresentou a maior taxa média de transpiração ($5,2884 \pm 0,2874 \mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), todavia, estatisticamente igual às médias verificadas nas estratégias de irrigação com déficit

controlado na fase vegetativa ($5,1047 \pm 0,2489 \text{ }\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), ao déficit controlado na fase de florescimento ($4,0663 \pm 0,3098 \text{ }\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e ao déficit controlado no enchimento dos grãos ($5,1866 \pm 0,4807 \text{ }\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Já para a variável condutância estomática, verifica-se que a estratégia de irrigação com déficit controlado na fase de enchimento de grãos ($0,4753 \pm 0,059 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e vegetativa ($0,4156 \pm 0,0202 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) proporcionaram maiores valores médios de condutância estomática (Figura 12B).

Estudos recentes demonstram que a irrigação plena, correspondente a 100% da reposição da evapotranspiração da cultura, proporciona valores máximos de variáveis fisiológicas, como as taxas de transpiração, otimizando o desempenho da cultura, abordagem parcialmente similar aos resultados verificados no presente estudo. Por exemplo, Anjos *et al.* (2022) em pesquisa conduzida no semiárido brasileiro, observaram que, sob irrigação plena, o milho apresentou taxas de assimilação de CO_2 de $22,49 \text{ }\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e transpiração de $4,46 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Em contrapartida, sob déficit hídrico de 50% da ETo, esses valores reduziram-se para $11,01 \text{ }\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $2,27 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente, evidenciando uma queda de até 49% na transpiração. Esses resultados indicam que a limitação hídrica compromete a abertura estomática e, consequentemente, a eficiência fotossintética da planta.

Os resultados verificados para a condutância estomática sob as diferentes estratégias de irrigação encontram respaldo em estudos recentes. Por exemplo, El Sabagh *et al.* (2017) demonstraram que, sob condições de déficit hídrico, híbridos de milho exibiram condutância estomática moderadamente elevada, correlacionada positivamente com o rendimento de grãos. Essa adaptação fisiológica sugere que, em determinadas condições, o milho pode manter ou até aumentar a abertura estomática para otimizar a assimilação de CO_2 , mesmo sob restrição hídrica. Esses parâmetros, associados à variáveis de produção, sugerem a possibilidade de cultivo dessa espécie em condição de restrição hídrica sem comprometer a produtividade, representando uma alternativa para a economia de água no cultivo.

Além disso, estudos sobre o acúmulo de osmólitos, como a prolina, indicam que o milho pode ajustar seu metabolismo para melhorar a eficiência do uso da água sob estresse hídrico. Em pesquisa recente, observou-se que cultivares de milho submetidos a déficit de irrigação apresentaram aumento significativo no conteúdo de prolina, o que está associado à estabilização das estruturas celulares e à manutenção da atividade fotossintética (BAZRGAR *et al.*, 2023). Esses mecanismos de adaptação podem explicar os resultados observados, onde o milho, mesmo sob déficit hídrico, manteve ou aumentou suas taxas fisiológicas. Tais achados ressaltam a importância de considerar, além da plasticidade fisiológica da cultura, fatores como a intensidade e a duração do estresse, as condições edafoclimáticas do ambiente

e o estágio fenológico no qual o déficit foi aplicado. O milho apresenta maior tolerância ao déficit hídrico em fases menos críticas, como a vegetativa, o que pode explicar a manutenção da atividade fisiológica sob determinadas condições. Além disso, a limitação hídrica moderada pode induzir mecanismos de ajuste osmótico e regulação estomática que, em curto prazo, não comprometem significativamente a fotossíntese, especialmente em ambientes onde a radiação solar, temperatura e umidade relativa favorecem a compensação fisiológica da planta.

Na Figura 13 a seguir, consta o comportamento das variáveis transpiração e condutância estomática aos 64 DAS em função dos manejos de bioinsumos aplicados (primeiro ciclo).

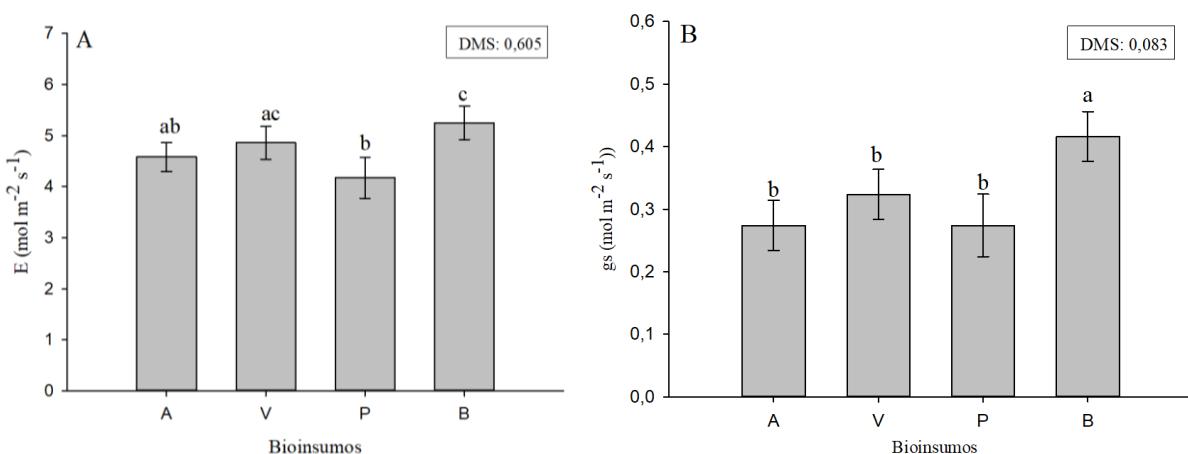


Figura 13. Transpiração (A) e condutância estomática (B) do milho sob diferentes manejos de bioinsumos promotores de crescimento no primeiro ciclo de cultivo aos 64 DAS (2023). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). A - Inoculação com *B. aryabhattai*; V - inoculação com *B. aryabhattai* + *A. brasiliense*; P - controle positivo, com adição de nitrogênio mineral (ureia - 45% de N - na dose recomendada conforme a análise do solo), sem a aplicação de bioinsumos; B - controle negativo, sem uso de nitrogênio mineral ou inoculação.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Conforme a Figura 13A, o controle negativo sem nitrogênio ($5,148 \pm 1,154 \mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) apresentou a maior taxa de transpiração. Este tratamento não diferiu do tratamento com *B. aryabhattai* coinoculado com *A. brasiliense* ($4,560 \pm 1,000 \mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), que também se assemelha aos outros dois tratamentos de menores taxas de transpiração, e iguais estatisticamente entre si, com taxas de $4,122 \pm 1,192 \mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e $4,271 \pm 0,867 \mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ nos tratamentos com bioinsumo de inoculação com *B. aryabhattai* e controle positivo com aplicação de nitrogênio, respectivamente. A condutância estomática (Figura 13B) apresentou padrão de comportamento parcialmente similar ao verificado para a transpiração. O controle negativo (sem nitrogênio) apresentou condutância estomática significativamente maior ($0,416 \pm 0,203 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) do que a inoculação com *B.*

aryabhattai ($0,274 \pm 0,130$ mol H₂O m⁻² s⁻¹), a combinação de *B. aryabhattai* + *A. brasiliense* ($0,326 \pm 0,158$ mol H₂O m⁻² s⁻¹) e o controle positivo ($0,274 \pm 0,140$ mol H₂O m⁻² s⁻¹).

Conforme supramencionado, no primeiro ciclo de cultivo, aos 64 DAS, observou-se que o tratamento controle, sem aplicação de bioinsumos ou adubação nitrogenada, apresentou as maiores médias de transpiração e condutância estomática no milho. Embora esses valores tenham sido estatisticamente equivalentes aos obtidos em alguns tratamentos com bioinsumos, o resultado sugere uma possível resposta adaptativa da planta à baixa disponibilidade nutricional, possivelmente intensificando a abertura estomática para maximizar a captação de CO₂. Esse comportamento foi descrito por Niu *et al.* (2006), que observaram que linhagens de milho eficientes no uso de nitrogênio mantiveram taxas de transpiração mais elevadas sob deficiência de N, indicando estratégias fisiológicas para otimizar a assimilação de nutrientes em condições limitantes. Isso ocorre porque o nitrogênio é um nutriente essencial para a síntese de proteínas envolvidas na fotossíntese e no metabolismo estomático, afetando diretamente processos como a regulação da abertura dos estômatos, a atividade enzimática do ciclo de Calvin e a produção de clorofila, e, dessa forma, a planta busca mecanismo para compensar fisiologicamente sua deficiência. Além disso, Zhang e Li (2009) relataram que a deficiência de nitrogênio pode levar a alterações na condutância estomática e na taxa de transpiração, como parte de mecanismos adaptativos da planta para lidar com o estresse nutricional.

Apesar disso, a literatura destaca que o uso de bioinsumos pode favorecer a estabilidade fisiológica das plantas ao longo do ciclo, mesmo que em momentos pontuais o controle apresente valores absolutos mais elevados. Por exemplo, Marques *et al.* (2021) demonstraram que a aplicação de biofertilizantes em soja contribuiu para a manutenção de níveis adequados de transpiração e condutância estomática ao longo de períodos de estresse hídrico, com impacto positivo na eficiência do uso da água. Além disso, a sinergia entre microrganismos e práticas de manejo nutricional pode promover efeitos cumulativos benéficos. Estudo realizado por Guidinelle (2023) mostrou que a integração de bioinsumos com adubação mineral resultou em ganhos na eficiência fisiológica e produtiva da cultura do milho. Assim, embora o controle negativo tenha mostrado maior atividade estomática aos 64 DAS, os bioinsumos seguem sendo promissores para estratégias sustentáveis de produção, sobretudo por seus efeitos ao longo do tempo e sob condições ambientais adversas.

Em relação a variável concentração interna de CO₂, no primeiro ciclo, houve interação significativa para os fatores irrigação e bioinsumos promotores de crescimento (Figura 14).

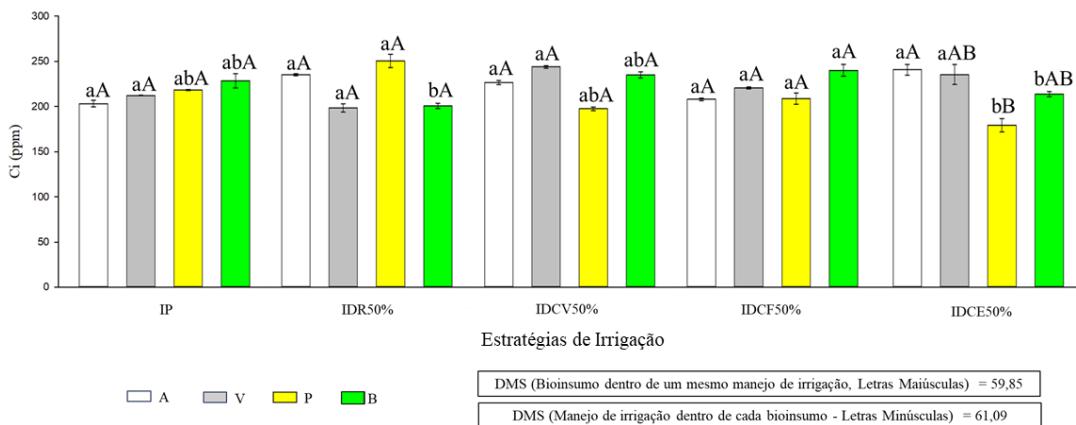


Figura 14. Concentração interna de CO₂ na cultura do milho sob diferentes estratégias de irrigação e bioinssumos promotores de crescimento no primeiro ciclo aos 64 DAS (2023).

Letras maiúsculas comparam médias de plantas com diferentes bioinssumos promotores de crescimento dentro de uma mesma estratégia de irrigação. Letra minúsculas comparam valores médios de plantas cultivadas sob diferentes estratégias de irrigação dentro de cada tipo de bioinsumo testado. IP - Irrigação plena ao longo de todo o ciclo; IDR50% - Irrigação com déficit regular durante todo o ciclo; IDCV50% - Irrigação com déficit controlado na fase de crescimento vegetativo; IDCF50% - Irrigação com déficit controlado na fase de florescimento e formação dos grãos; IDCE50% - Irrigação com déficit controlado na fase de enchimento de grão. A - Inoculação com *B. aryabhattai*; V - inoculação com *B. aryabhattai* + *A. brasiliense*; P - controle positivo, com adição de nitrogênio mineral (ureia - 45% de N - na dose recomendada conforme a análise do solo), sem a aplicação de bioinssumos; B - controle negativo, sem uso de nitrogênio mineral ou inoculação.

Fonte: Elaborado pelo Autor

A análise da figura 14 permite inferir que, não obstante a ocorrência de médias superiores associadas ao controle negativo (sem aplicação de ureia) em algumas estratégias de irrigação, o emprego de *B. aryabhattai* de forma isolada ou coinoculado com *A. brasiliense* proporcionaram incremento nessa variável sob as estratégias de irrigação IDCV e IDCE.

Especificamente, tratamentos submetidos a déficit hídrico moderado, quando combinados com a aplicação de bioinssumos, apresentaram valores de Ci mais equilibrados em comparação ao controle sem inoculação. Esse comportamento sugere que a presença de bioinssumos pode mitigar os efeitos negativos do estresse hídrico sobre a assimilação de CO₂, promovendo uma regulação estomática mais eficiente. Estudos anteriores corroboram com esse resultado; por exemplo, Işık e Ortaş (2024) demonstraram que a inoculação com micorrizas, aliada à aplicação de biochar, melhorou a atividade fotossintética e a eficiência no uso da água em condições de irrigação deficitária, indicando uma adaptação fisiológica que favorece a manutenção da Ci em níveis adequados sob estresse hídrico.

Além disso, a aplicação de bioinssumos parece influenciar positivamente a dinâmica do CO₂ interno, mesmo sob condições de irrigação plena. Piatì *et al.* (2023) observaram que a aplicação de bioestimulantes em milho resultou em melhorias nas trocas gasosas, incluindo a concentração interna de CO₂, independentemente do regime hídrico, sugerindo que os bioinssumos podem otimizar processos fisiológicos chave.

Complementarmente, Piaty et al. (2023) relataram ainda que a interação entre níveis elevados de CO₂ atmosférico e irrigação adequada promoveu aumentos significativos na biomassa aérea do milho, indicando que a Ci é um indicador sensível das condições ambientais e do manejo agronômico. Portanto, a interação entre irrigação e bioinsumos desempenha um papel crucial na modulação da Ci, refletindo diretamente na eficiência fotossintética e, consequentemente, no desempenho produtivo da cultura do milho.

No segundo ciclo, na avaliação realizada aos 72 DAS, as variáveis Ci e A/Ci responderam de forma significativa a interação dos fatores estudados, conforme pode-se observar, respectivamente, nas Figuras 15A e 15B a seguir.

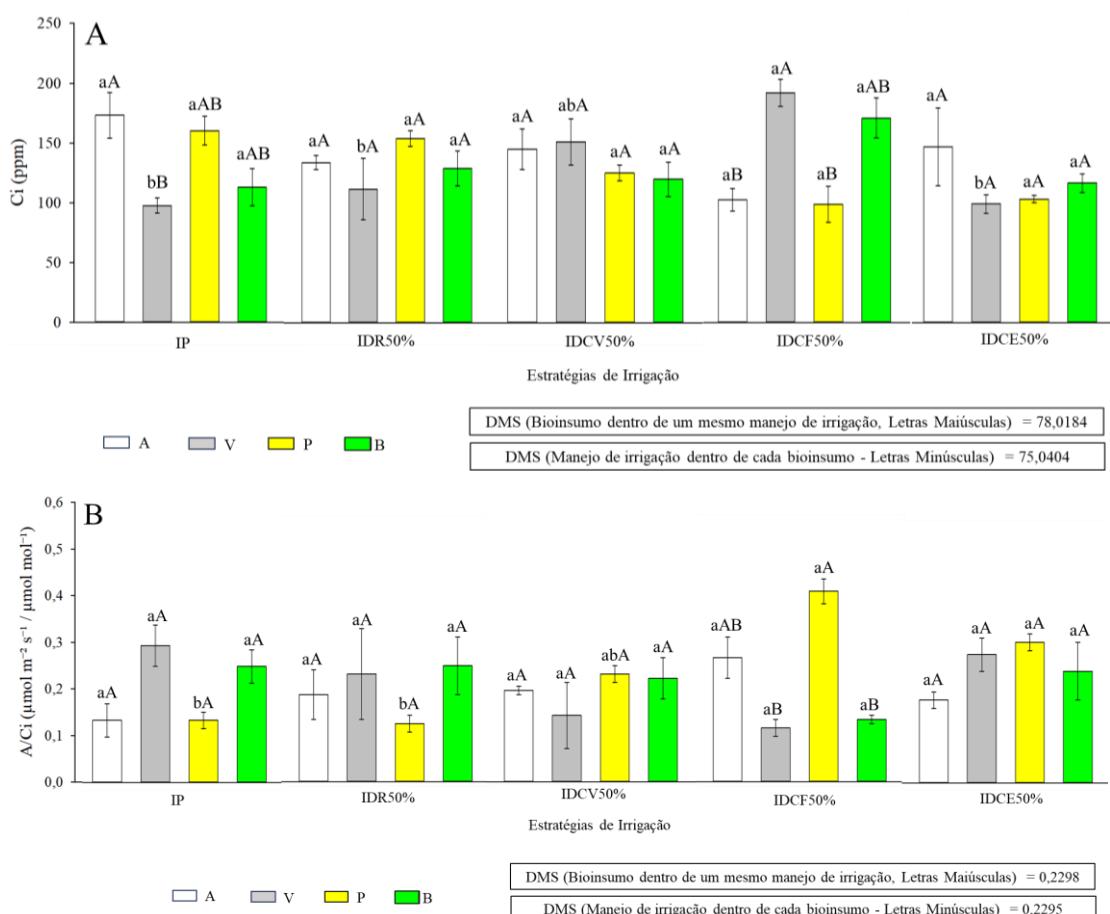


Figura 15. Concentração interna de CO₂ (A) e relação entre fotossíntese e concentração interna de CO₂ (B) na cultura do milho sob diferentes estratégias de irrigação e bioinsumos promotores de crescimento no segundo ciclo aos 72 DAS (2024).

Letras maiúsculas comparam médias de plantas com diferentes bioinsumos promotores de crescimento dentro de uma mesma estratégia de irrigação. Letra minúsculas comparam valores médios de plantas cultivadas sob diferentes estratégias de irrigação dentro de cada tipo de bioinsumo testado. IP - Irrigação plena ao longo de todo o ciclo; IDR50% - Irrigação com déficit regular durante todo o ciclo; IDCV50% - Irrigação com déficit controlado na fase de crescimento vegetativo; IDCF50% - Irrigação com déficit controlado na fase de florescimento e formação dos grãos; IDCE50% - Irrigação com déficit controlado na fase de enchimento de grão. A - Inoculação com *B. aryabhattai*; V - inoculação com *B. aryabhattai* + *A. brasiliense*; P - controle positivo, com adição de nitrogênio mineral (ureia - 45% de N - na dose recomendada conforme a análise do solo), sem a aplicação de bioinsumos; B - controle negativo, sem uso de nitrogênio mineral ou inoculação.

Fonte: Elaborado pelo Autor

A maior concentração interna de CO₂ (Figura 15A) foi observada sob irrigação com déficit controlado na fase de florescimento combinada a coinoculação de *B. aryabhattai* + *A. brasiliense* ($192,33 \pm 11,88 \mu\text{mol mol}^{-1}$), diferindo significativamente de combinações como irrigação plena com inoculação ($97,8 \pm 14,9 \mu\text{mol mol}^{-1}$) e irrigação com déficit controlado na fase vegetativa com controle positivo ($99,0 \pm 10,29 \mu\text{mol mol}^{-1}$). Na variável A/Ci, a interação significativa indica que a eficiência de carboxilação depende da combinação entre as estratégias de irrigação e de inoculação, todavia, o teste de Tukey revela que apenas algumas poucas combinações apresentaram contrastes estatísticos relevantes.

A maior média de concentração interna de CO₂ (Ci) foi verificada no tratamento que combinou o déficit hídrico controlado na fase de florescimento (IDCF50%) com a coinoculação de *B. aryabhattai* e *A. brasiliense*. Em contrapartida, os menores valores foram observados sob irrigação plena com a mesma coinoculação. Esse comportamento sugere que, em condições de estresse hídrico moderado, o acúmulo de CO₂ na câmara subestomática pode estar relacionado à redução da atividade bioquímica do ciclo de Calvin, sobretudo da enzima Rubisco, como mecanismo típico de limitação não estomática. Flexas *et al.* (2006) descreveram esse tipo de resposta como indicativo de que, sob déficit hídrico, o controle fotossintético deixa de ser regulado primariamente pelos estômatos e passa a ser governado por limitações metabólicas internas. Assim, mesmo em condições de bioestimulação por coinoculação, a restrição hídrica durante o florescimento pode comprometer a capacidade assimilatória da planta, resultando no acúmulo de CO₂ interno. Por outro lado, os menores valores de Ci sob irrigação plena podem estar relacionados a maior eficiência fotossintética da cultura em ambiente hídrico favorável, com plena capacidade de assimilação do carbono disponível.

A variável A/Ci, que representa a eficiência de carboxilação da Rubisco, foi significativamente influenciada pela interação entre os fatores de irrigação e aplicação de bioinsumos. Embora os contrastes estatísticos tenham sido modestos, os dados indicaram que a maior relação A/Ci ocorreu no tratamento com irrigação deficitária na fase de florescimento associado ao controle positivo (adubação nitrogenada sem bioinsumos), o que sugere um desempenho fotossintético relativamente eficiente, mesmo sob estresse moderado, desde que haja disponibilidade de nitrogênio. Por outro lado, a menor eficiência de carboxilação foi observada quando essa mesma condição hídrica foi combinada com a coinoculação de *B. aryabhattai* e *A. brasiliense*. Esse resultado pode indicar que, sob déficit hídrico em fase reprodutiva, o estímulo fisiológico promovido pelos bioinsumos não foi suficiente para superar as limitações metabólicas impostas pelo estresse, reduzindo a capacidade assimilatória

da planta. Essa divergência em relação a estudos como o de Piaty *et al.* (2023), que relataram aumentos na eficiência fotossintética com o uso de bioestimulantes, pode estar associada às condições específicas do presente experimento, especialmente à severidade do déficit hídrico e à sensibilidade da fase fenológica envolvida. A razão A/Ci é reconhecida como um indicador sensível da eficiência da fotossíntese líquida sob estresse, refletindo não apenas a condutância estomática, mas também a capacidade bioquímica do aparato fotossintético em fixar CO₂. Esses resultados, embora não conclusivos, reforçam a complexidade das interações entre bioinsumos, nutrição e estresse hídrico, especialmente em fases fenológicas críticas, e indicam a necessidade de estudos complementares para elucidar os mecanismos fisiológicos envolvidos e validar a eficácia dessas tecnologias em diferentes condições de manejo.

Por fim, observa-se que as maiores variações nos valores de Ci e na razão A/Ci ocorreram principalmente em combinações envolvendo fases fenológicas críticas do desenvolvimento do milho, como o florescimento e o enchimento de grãos, o que está em consonância com os achados de Meng *et al.* (2014), que destacaram o impacto negativo do déficit hídrico nessas fases sobre a assimilação de carbono. No presente estudo, embora em alguns tratamentos com aplicação de bioinsumos tenham sido observadas médias diferenciadas dessas variáveis fisiológicas, o comportamento não foi consistente entre os ciclos, especialmente no segundo, onde não se verificou resposta significativa à inoculação. Isso sugere que os efeitos dos bioinsumos sobre a eficiência fisiológica do milho podem depender fortemente das condições ambientais, do grau de estresse hídrico e da fase fenológica da planta. Vurukonda *et al.* (2016) destacam que rizobactérias promotoras de crescimento podem atuar na modulação do sistema antioxidante, na produção de fitohormônios e na melhoria da eficiência do uso da água, promovendo maior resiliência fotossintética. No entanto, os resultados obtidos neste estudo indicam que tais efeitos não se manifestaram de forma uniforme, o que reforça a necessidade de investigações adicionais para compreender melhor os mecanismos de interação entre bioinsumos e a fisiologia vegetal sob diferentes estratégias de irrigação.

4.3 Coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (Ky)

Na Tabela 5 a seguir constam os valores de Yr, Ym, (1 – Yr/Ym), (1 – ETr/ETm) e os coeficientes de sensibilidade Ky calculados para os tratamentos sob déficit hídrico nos diferentes estádios fenológicos da cultura do milho.

Tabela 5. Valores de Yr, Ym, (1 – Yr/Ym), (1 – ETr/ETm) e dos coeficientes de sensibilidade Ky no primeiro e segundo ciclo de cultivo do milho.

Primeiro Ciclo de Cultivo - 2023						
Tratamentos	Yr	Ym	(ETr/ETm)	[1-(Yr/Ym)]	[1-(ETr/ETm)]	Ky
IDR50% - A	5266	5918	0,555	0,11	0,44	0,25
IDR50% - V	4128	5761	0,555	0,28	0,44	0,64
IDR50% - P	4352	6112	0,555	0,29	0,44	0,65
IDR50% - B	4146	6385	0,555	0,35	0,44	0,79
IDCV50% - A	4097	5918	0,810	0,31	0,19	1,62
IDCV50% - V	5170	5761	0,810	0,10	0,19	0,54
IDCV50% - P	5110	6112	0,810	0,16	0,19	0,86
IDCV50% - B	4447	6385	0,810	0,30	0,19	1,60
IDCF50% - A	5240	5918	0,903	0,11	0,10	1,18
IDCF50% - P	6039	6112	0,903	0,01	0,10	0,12
IDCF50% - B	4988	6385	0,903	0,22	0,10	2,25
IDCE50% - A	4992	5918	0,896	0,16	0,10	1,50
IDCE50% - V	5523	5761	0,896	0,04	0,10	0,40
IDCE50% - P	4445	6112	0,896	0,27	0,10	2,61
IDCE50% - B	5497	6385	0,896	0,14	0,10	1,33

Primeiro Ciclo de Cultivo - 2024						
Tratamentos	Yr	Ym	(ETr/ETm)	[1-(Yr/Ym)]	[1-(ETr/ETm)]	Ky
IDR50% - A	5003	6808	0,558	0,27	0,44	0,60
IDR50% - V	5242	6561	0,558	0,20	0,44	0,45
IDR50% - P	6158	6284	0,558	0,02	0,44	0,05
IDR50% - B	4830	6026	0,558	0,20	0,44	0,45
IDCV50% - A	6106	6808	0,806	0,10	0,19	0,53
IDCV50% - V	7026	6561	0,806	-0,07	0,19	-0,37
IDCV50% - P	6106	6284	0,806	0,03	0,19	0,15
IDCV50% - B	6626	6026	0,806	-0,10	0,19	-0,51
IDCF50% - A	5360	6808	0,890	0,21	0,11	1,93
IDCF50% - V	6512	6561	0,890	0,01	0,11	0,07
IDCF50% - P	6030	6284	0,890	0,04	0,11	0,37
IDCE50% - A	4257	6808	0,913	0,37	0,09	4,33
IDCE50% - V	4839	6561	0,913	0,26	0,09	3,03
IDCE50% - P	4518	6284	0,913	0,28	0,09	3,25
IDCE50% - B	4390	6026	0,913	0,27	0,09	3,14

IP - Irrigação plena ao longo de todo o ciclo; IDR50% - Irrigação com déficit regular durante todo o ciclo; IDCV50% - Irrigação com déficit controlado na fase de crescimento vegetativo; IDCF50% - Irrigação com déficit controlado na fase de florescimento e formação dos grãos; IDCE50% - Irrigação com déficit controlado na fase de enchimento de grão; Ky = fator de sensibilidade ao déficit hídrico (adimensional); Yr = rendimento real da cultura sob déficit hídrico (kg ha^{-1}); Ym = rendimento máximo da cultura sob irrigação plena (kg ha^{-1}); ETr = evapotranspiração real da cultura (mm); ETm = evapotranspiração máxima da cultura, sob irrigação plena (mm). Os tratamentos IDCF50% - V em 2023 e IDCF50% - B em 2024 foram excluídos da avaliação pois apresentaram valores negativos, o que restringe explicações físicas para a expressão dos resultados.

Fonte: Elaborado pelo Autor

O coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (Ky) é um indicador amplamente utilizado para quantificar a resposta das culturas à redução na disponibilidade hídrica. Este coeficiente permite avaliar a proporção de perda de produtividade relativa em função da limitação de evapotranspiração, sendo particularmente útil para subsidiar estratégias de irrigação, principalmente em regiões semiáridas, onde a disponibilidade de água é um fator limitante à produção agrícola (DOORENBOS; KASSAM, 1979; STEDUTO *et al.*, 2012).

Na Tabela 5 estão apresentados os valores de Ky para os tratamentos sob déficit hídrico, considerando os diferentes estádios fenológicos da cultura do milho, nos dois ciclos experimentais conduzidos. Observa-se uma grande variação nos valores de Ky, e valores superiores a 2, o que evidencia a complexidade da interação entre os fatores hídricos e biológicos na resposta da cultura estudada.

De acordo com a classificação proposta pelo Boletim FAO 33, culturas com $Ky < 0,85$ são consideradas de baixa sensibilidade ao déficit hídrico; valores entre 0,85 e 1,0 indicam sensibilidade intermediária-baixa; entre 1,0 e 1,15 representam sensibilidade intermediária-alta; e $Ky > 1,15$ caracteriza culturas altamente sensíveis (DOORENBOS; KASSAM, 1979). Já segundo o Boletim FAO 66, valores $Ky > 1$ indicam alta sensibilidade; $Ky = 1$, sensibilidade proporcional; e $Ky < 1$, baixa sensibilidade (STEDUTO *et al.*, 2012).

No primeiro ciclo de cultivo (2023), os valores de Ky variaram entre 0,12 e 2,25. Os menores valores foram observados em tratamentos com irrigação deficitária na fase reprodutiva (IDR50%) e inoculação com *Bacillus aryabhattachai*, que apresentaram $Ky = 0,25$, indicando baixa sensibilidade da cultura sob essa estratégia. Isso pode ser atribuído à capacidade adaptativa do milho, especialmente quando associado à ação de microrganismos promotores de crescimento, que favorecem o desenvolvimento radicular, o uso mais eficiente da água e o equilíbrio hormonal da planta (VURUKONDA *et al.*, 2016; PIATI *et al.*, 2023).

Por outro lado, valores elevados de Ky, como os verificados no tratamento IDCF50%-B ($Ky = 2,25$), indicam alta sensibilidade da cultura à restrição hídrica nesse estádio fenológico, quando a planta se encontra nas fases de florescimento e início da formação de grãos. Esta fase é amplamente reconhecida como crítica para o milho, em virtude da intensa demanda hídrica para processos fisiológicos como a polinização, fecundação e formação de grãos (BERGAMASCHI *et al.*, 2004; SILVA *et al.*, 2021). A ausência de adubação nitrogenada e de inoculantes neste tratamento pode ter agravado os efeitos negativos do estresse hídrico, refletindo na baixa produtividade e, consequentemente, na elevação do Ky.

Valores altos de Ky também foram registrados nos tratamentos IDCV50%-A (1,62)

e IDCV50%-B (1,60), correspondentes à fase vegetativa da cultura. Embora essa fase costume apresentar maior plasticidade fisiológica à escassez hídrica (FERRARI *et al.*, 2015), os dados sugerem que, na ausência de condições ideais de inoculação ou adubação, o estresse pode comprometer significativamente o desenvolvimento inicial da planta, afetando o potencial produtivo total.

Em contraste, tratamentos como IDCF50%-P ($K_y = 0,12$) e IDR50%-A ($K_y = 0,25$) apresentaram baixo valor de K_y , indicando que sob determinadas condições hídricas, especialmente quando associadas à inoculação, a cultura do milho pode manter boa eficiência produtiva, mesmo com limitação de água. Sousa (2020), em estudo com tomate-cereja sob déficit hídrico, também observou variação no K_y em função do estádio fenológico, sendo os menores valores registrados nas fases vegetativas e os maiores nas fases de floração e frutificação.

No segundo ciclo de cultivo (2024), os valores de K_y apresentaram comportamento semelhante ao primeiro, embora em menor magnitude. Isso pode estar relacionado a condições climáticas mais favoráveis ou a uma melhor adaptação do sistema radicular da planta, que já havia sido estabelecido no primeiro ciclo. Resultados semelhantes foram observados por Imark (2015) e Patanè *et al.* (2010), que relatam que a variação do K_y entre ciclos ou entre genótipos pode estar associada ao potencial genético de adaptação, ao tipo de solo e à técnica de irrigação utilizada.

É importante ressaltar que a magnitude do K_y está diretamente relacionada à eficiência do uso da água pela cultura. Nesse contexto, valores mais baixos indicam maior resiliência produtiva frente ao déficit hídrico, o que é desejável em sistemas de produção com restrição de recursos hídricos. O conhecimento desses coeficientes permite ao agricultor definir estratégias de irrigação deficitária mais eficientes, alocando água em momentos de maior exigência fisiológica e promovendo a sustentabilidade do sistema produtivo.

De modo geral, os resultados obtidos evidenciam que a sensibilidade do milho ao déficit hídrico varia de forma marcante conforme o estádio fenológico e a estratégia de irrigação adotada. As menores perdas relativas de produtividade, refletidas nos menores valores de K_y , ocorreram principalmente em tratamentos com inoculação bacteriana e aplicação de déficit hídrico em fases menos críticas, como a vegetativa. Por outro lado, os maiores coeficientes foram observados nos tratamentos que associaram estresse hídrico em fases reprodutivas, ausência de adubação nitrogenada e não utilização de bioinsumos, confirmando a vulnerabilidade da cultura nessas condições.

Esses achados reforçam a importância de práticas integradas de manejo hídrico e

biológico na mitigação dos efeitos do estresse em ambientes semiáridos. A aplicação estratégica de inoculantes, aliada à irrigação controlada em fases fenológicas adequadas, pode resultar em sistemas produtivos mais eficientes e menos dependentes de grandes volumes de água. Assim, a quantificação do K_y , associada à interpretação criteriosa dos dados experimentais, mostra-se uma ferramenta valiosa para orientar a tomada de decisão no manejo da irrigação em sistemas agrícolas sustentáveis.

4.4 Análise econômico-social

A análise econômica dos sistemas de produção é essencial para compreender sua viabilidade e sustentabilidade. Entre os elementos centrais dessa avaliação está a renda do agricultor, uma vez que sua permanência na atividade agropecuária, bem como a fixação da família no campo e a melhoria da qualidade de vida, está diretamente associada à geração de renda. Dessa forma, compreender a capacidade de reprodução social da unidade produtiva requer indicadores econômicos que refletem essa realidade. Neste trabalho, a análise da renda foi realizada com base no valor agregado da produção, considerando os custos com juros provenientes de financiamentos, os encargos tributários pagos ao Estado, a remuneração da mão de obra empregada e os custos totais com insumos de produção.

Para estimativa dos parâmetros empregados na análise econômica considerou-se informações relativas a um produtor rural de porte médio que se enquadra em linhas de financiamento do FNE Rural (Fundo Constitucional de Financiamento do Nordeste), do Banco do Nordeste. Para as análises realizadas considerou-se a taxa de juros de 6,5% ao ano e um financiamento de R\$ 100.000,00, com quatro anos de carência e prazo de 12 anos.

Com relação à propriedade da terra e área cultivada, considerou-se uma propriedade de 30 hectares, dos quais, 25 serão empregadas para o cultivo do milho.

Em termos de infraestrutura, considerou-se que o produtor era associado a uma cooperativa que dispunha de maquinários para processos de semeadura, adubações e colheitas, e que a área é estruturada com sistema de irrigação e bombeamento de água, considerando para fins de análise, apenas o custo com combustível (o investimento em bens duráveis como materiais de irrigação e bombeamento ocorre basicamente no primeiro ciclo de produção).

A propriedade possui três funcionários fixos com remuneração de um salário mínimo mensal. Considerou-se dois ciclos de produção por ano, o que reduz o custo relativo de mão de obra anual. Para fins de cálculo do VBP (Valor Bruto da Produção), levou-se em consideração a produção efetivamente obtida em um ciclo.

O ITR, que representa as taxas de juros pagas ao Estado, refere-se ao imposto pago de um imóvel rural. Considerando a alíquota de 0,03% para áreas de uso agrícola acima de 80%, o ITR foi estimado em R\$ 315,00 cujo valor por hectare produtivo foi de R\$ 12,60.

Diante do exposto, considerando informações de cadernos setoriais do Banco do Nordeste para produção de milho (COÊLHO, 2023) e informações locais sobre preços de insumos, estimou-se o custo de implantação de um hectare de milho em R\$ 3.400,00. É relevante destacar que nas diferentes estratégias de irrigação e aplicação de bioinsumos, alguns custos adicionais diferenciaram-se entre os tratamentos, como o custo com energia elétrica, devido a variação no tempo de funcionamento do sistema de bombeamento, e aquisição de bioinsumos. Essas diferenças, todavia, estão englobadas no serviço da dívida do financiamento, que, na prática representa o custo da produção/investimento.

Para estimar o valor agregado da produção considerou-se o valor de R\$ 66,00 para a saca de 60 kg de milho, estimado com base em informações do mercado local. A renda do agricultor (RA) foi calculada através da diferença entre o valor agregado da produção e os gastos com juros pagos à agência financiadora, tarifas pagas ao Estado e salários pagos aos trabalhadores, valor ponderado considerando 25 hectares e dois ciclos anuais de produção. Com base nas informações apresentadas, constam, nas Tabelas 6 e 7 a seguir, o resumo dos valores obtidos de RA para os diferentes sistemas de produção.

Tabela 6. VBP e parâmetros utilizados para cálculo da renda do agricultor (RA) de cada sistema de produção no ciclo de cultivo do milho em 2023.

Tratamentos	Produção (kg ha ⁻¹)	Ciclo de Produção 2023					
		VBP	VA	ITR	J	S	RA
IP-V	5761	6337,10	12674,20	12,6	1001,92	633,6	11026,08
IP-P	6112	6723,20	13446,40	12,6	1001,92	633,6	11798,28
IP-B	6385	7023,50	14047,00	12,6	1001,92	633,6	12398,88
IP-A	5918	6509,80	13019,60	12,6	1001,92	633,6	11371,48
IDR50%-V	4128	4540,80	9081,60	12,6	1001,92	633,6	7433,48
IDR50%-P	4352	4787,20	9574,40	12,6	1001,92	633,6	7926,28
IDR50%-B	4146	4560,60	9121,20	12,6	1001,92	633,6	7473,08
IDR50%-A	5266	5792,60	11585,20	12,6	1001,92	633,6	9937,08
IDCV50%-V	5170	5687,00	11374,00	12,6	1001,92	633,6	9725,88
IDCV50%-P	5110	5621,00	11242,00	12,6	1001,92	633,6	9593,88
IDCV50%-B	4447	4891,70	9783,40	12,6	1001,92	633,6	8135,28
IDCV50%-A	4097	4506,70	9013,40	12,6	1001,92	633,6	7365,28
IDCF50%-V	6193	6812,30	13624,60	12,6	1001,92	633,6	11976,48
IDCF50%-P	6039	6642,90	13285,80	12,6	1001,92	633,6	11637,68
IDCF50%-B	4988	5486,80	10973,60	12,6	1001,92	633,6	9325,48
IDCF50%-A	5240	5764,00	11528,00	12,6	1001,92	633,6	9879,88
IDCE50%-V	5523	6075,30	12150,60	12,6	1001,92	633,6	10502,48
IDCE50%-P	4445	4889,50	9779,00	12,6	1001,92	633,6	8130,88
IDCE50%-B	5497	6046,70	12093,40	12,6	1001,92	633,6	10445,28
IDCE50%-A	4992	5491,20	10982,40	12,6	1001,92	633,6	9334,28

IP - Irrigação plena ao longo de todo o ciclo; IDR50% - Irrigação com déficit regular durante todo o ciclo; IDCV50% - Irrigação com déficit controlado na fase de crescimento vegetativo; IDCF50% - Irrigação com déficit controlado na fase de florescimento e formação dos grãos; IDCE50% - Irrigação com déficit controlado na fase de enchimento de grão; VBP: Valor bruto da produção, R\$; VA: Valor agregado, R\$; ITR: Imposto Territorial Rural, R\$; J: Taxa de juros anual do financiamento, R\$; S: Custos de mão-de-obra, R\$; RA: Renda do Agricultor, R\$.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 7. VBP e parâmetros utilizados para cálculo da renda do agricultor (RA) de cada sistema de produção no ciclo de cultivo do milho em 2024.

Tratamentos	Produção (kg ha ⁻¹)	Ciclo de Produção - 2024					
		VBP	VA	ITR	J	S	RA
IP-A	6808	7488,80	14977,60	12,6	1001,92	677,7	13285,32
IP-V	6561	7217,10	14434,20	12,6	1001,92	677,7	12741,92
IP-P	6284	6912,40	13824,80	12,6	1001,92	677,7	12132,52
IP-B	6026	6628,60	13257,20	12,6	1001,92	677,7	11564,92
IDR50%-A	5003	5503,30	11006,60	12,6	1001,92	677,7	9314,32
IDR50%-V	5242	5766,20	11532,40	12,6	1001,92	677,7	9840,12
IDR50%-P	6158	6773,80	13547,60	12,6	1001,92	677,7	11855,32
IDR50%-B	4830	5313,00	10626,00	12,6	1001,92	677,7	8933,72
IDCV50%-A	6106	6716,60	13433,20	12,6	1001,92	677,7	11740,92
IDCV50%-V	7026	7728,60	15457,20	12,6	1001,92	677,7	13764,92
IDCV50%-P	6106	6716,60	13433,20	12,6	1001,92	677,7	11740,92
IDCV50%-B	6626	7288,60	14577,20	12,6	1001,92	677,7	12884,92
IDCF50%-A	5360	5896,00	11792,00	12,6	1001,92	677,7	10099,72
IDCF50%-V	6512	7163,20	14326,40	12,6	1001,92	677,7	12634,12
IDCF50%-P	6030	6633,00	13266,00	12,6	1001,92	677,7	11573,72
IDCF50%-B	6165	6781,50	13563,00	12,6	1001,92	677,7	11870,72
IDCE50%-A	4257	4682,70	9365,40	12,6	1001,92	677,7	7673,12
IDCE50%-V	4839	5322,90	10645,80	12,6	1001,92	677,7	8953,52
IDCE50%-P	4518	4969,80	9939,60	12,6	1001,92	677,7	8247,32
IDCE50%-B	4390	4829,00	9658,00	12,6	1001,92	677,7	7965,72

IP - Irrigação plena ao longo de todo o ciclo; IDR50% - Irrigação com déficit regular durante todo o ciclo; IDCV50% - Irrigação com déficit controlado na fase de crescimento vegetativo; IDCF50% - Irrigação com déficit controlado na fase de florescimento e formação dos grãos; IDCE50% - Irrigação com déficit controlado na fase de enchimento de grão; VBP: Valor bruto da produção, R\$; VA: Valor agregado, R\$; ITR: Imposto Territorial Rural, R\$; J: Taxa de juros anual do financiamento, R\$; S: Custos de mão-de-obra, R\$; RA: Renda do Agricultor, R\$.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Note que em 2023, as maiores rendas foram obtidas sob irrigação plena sem aplicação de bioinsumos e na estratégia com deficit conforme IDCV50%, com o emprego de *B. aryabhattai* + *A. brasiliense*. Em 2024, a maior renda foi observada em IDCV50% associado a *B. aryabhattai* + *A. brasiliense*, e em IP com aplicação de *B. aryabhattai*. Para todos os sistemas de cultivo foi calculado o nível de reprodução social (NRS) que está relacionado à renda necessária para a reprodução social da unidade produtiva, no caso, representada pelo salário mínimo.

A análise detalhada das Tabelas 6 e 7 revela que os sistemas de produção que associaram irrigação deficitária controlada com a coinoculação de *Bacillus aryabhattai* e

Azospirillum brasiliense apresentaram, em geral, desempenho econômico superior, especialmente no segundo ciclo de cultivo. A título de exemplo, conforme mencionado anteriormente, o tratamento IDCV50% - V, que corresponde ao déficit hídrico controlado durante a fase vegetativa associado à coinoculação, resultou na maior renda do agricultor (RA) em 2024, com R\$ 13.764,92 ha⁻¹, superando inclusive os valores observados sob irrigação plena. Esse resultado sugere que, quando bem sincronizado com as fases menos críticas do desenvolvimento da planta, o estresse hídrico moderado pode ser compensado ou até superado com o uso de bioinsumos, permitindo uma racionalização do uso da água sem comprometer a rentabilidade da atividade agrícola.

Observa-se ainda que, em diversos tratamentos com aplicação de bioinsumos, os valores de renda do agricultor superaram aqueles obtidos nos controles sem inoculação, tanto positivos (com ureia) quanto negativos. A inoculação com *B. aryabhattai*, isoladamente, também apresentou desempenho expressivo em alguns tratamentos, como em IP - A e IDCF50% - A, evidenciando que mesmo sem a coinoculação, há efeito benéfico econômico advindo do uso de bioinsumos. Essa vantagem econômica é ainda mais relevante quando se considera que o custo adicional da aplicação dos inoculantes está diluído no custo total de produção e é relativamente pequeno diante dos ganhos em produtividade e valor agregado.

Além da contribuição direta para o aumento da renda líquida do agricultor, o uso de bioinsumos tem potencial para reduzir a dependência de insumos químicos, como fertilizantes nitrogenados, os quais representam parcela significativa dos custos variáveis na produção de milho. A substituição parcial da adubação mineral por inoculantes de baixo custo contribui para maior sustentabilidade econômica, ambiental e social da produção, especialmente em contextos como o do semiárido nordestino, onde a disponibilidade de recursos hídricos e financeiros é mais limitada. Assim, a incorporação desses insumos biológicos nos sistemas de produção pode fortalecer a agricultura familiar e facilitar o acesso a linhas de crédito voltadas à produção sustentável.

Por fim, é válido destacar que, embora alguns tratamentos com bioinsumos não tenham apresentado diferenças estatísticas significativas em variáveis agronômicas isoladas, o impacto econômico agregado foi positivo na maioria dos casos, o que reforça a importância de se considerar análises integradas que incluem tanto o desempenho fisiológico e produtivo quanto os aspectos financeiros da produção. Tal abordagem é essencial para orientar políticas públicas e ações de extensão rural, especialmente no incentivo ao uso de tecnologias de baixo custo e alto retorno social. Assim, os dados aqui obtidos confirmam que o uso estratégico de bioinsumos, aliado a estratégias hídricas eficientes, pode representar uma importante

alternativa para a viabilidade econômica da produção de milho em ambientes com recursos limitados

Com relação a avaliação da renda do agricultor de forma específica, considerou-se uma formação familiar padrão composta por cinco pessoas. De posse da renda do agricultor (RA) calculada para cada sistema de cultivo (tratamentos) em 2023 e 2024, traçaram-se relações lineares entre as rendas calculadas e área em hectares (área útil de 25 ha). Na Tabela 8 a seguir constam as equações lineares para cada sistema de cultivo estudado.

Tabela 8. Equações lineares relacionando a renda do agricultor e a área cultivada.

Tratamento	Equações - 2023	Equações - 2024
IP - A	$y = 11026,08x$	$y = 13285,32x$
IP - V	$y = 11798,28x$	$y = 12741,92x$
IP - P	$y = 12398,88x$	$y = 12132,52x$
IP - B	$y = 11371,48x$	$y = 11564,92x$
IDR50% - A	$y = 7433,48x$	$y = 9314,32x$
IDR50% - V	$y = 7926,28x$	$y = 9840,12x$
IDR50% - P	$y = 7473,08x$	$y = 11855,32x$
IDR50% - B	$y = 9937,08x$	$y = 8933,72x$
IDCV50% - A	$y = 9725,88x$	$y = 11740,92x$
IDCV50% - V	$y = 9593,88x$	$y = 13764,92x$
IDCV50% - P	$y = 8135,28x$	$y = 11740,92x$
IDCV50% - B	$y = 7365,28x$	$y = 12884,92x$
IDCF50% - A	$y = 11976,48x$	$y = 10099,72x$
IDCF50% - V	$y = 11637,68x$	$y = 12634,12x$
IDCF50% - P	$y = 9325,48x$	$y = 11573,72x$
IDCF50% - B	$y = 9879,88x$	$y = 11870,72x$
IDCE50% - A	$y = 10502,48x$	$y = 7673,12x$
IDCE50% - V	$y = 8130,88x$	$y = 8953,52x$
IDCE50% - P	$y = 10445,28x$	$y = 8247,32x$
IDCE50% - B	$y = 9334,28x$	$y = 7965,72x$

IP - Irrigação plena ao longo de todo o ciclo; IDR50% - Irrigação com déficit regular durante todo o ciclo; IDCV50% - Irrigação com déficit controlado na fase de crescimento vegetativo; IDCF50% - Irrigação com déficit controlado na fase de florescimento e formação dos grãos; IDCE50% - Irrigação com déficit controlado na fase de enchimento de grão; y - renda do agricultor, R\$; x – área cultivada em ha.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Considerando o salário de R\$ 1302,00 em 2023 e R\$ 1412,00 em 2024, e a família composta por cinco pessoas, o NRS foi estimado em R\$ 6510,00 em 2023 e R\$ 7.590,00 mensais (R\$ 78.120,00 e R\$ 91.080,00 anuais, respectivamente). A partir dessas informações e das relações lineares entre renda do agricultor e área cultivada, estimou-se a

área mínima de cultivo para assegurar a reprodução social (NRS) do agricultor e sua família (Tabela 9).

Tabela 9. Área mínima para assegurar o nível de reprodução social (AM-NRS) nos diferentes tratamentos em 2023 e 2024.

Tratamento	AM-NSR – 2023 (ha)	AM-NSR – 2024 (ha)
IP - A	7,09	6,86
IP - V	6,62	7,15
IP - P	6,30	7,51
IP - B	6,87	7,88
IDR50% - A	10,51	9,78
IDR50% - V	9,86	9,26
IDR50% - P	10,45	7,68
IDR50% - B	7,86	10,20
IDCV50% - A	8,03	7,76
IDCV50% - V	8,14	6,62
IDCV50% - P	9,60	7,76
IDCV50% - B	10,61	7,07
IDCF50% - A	6,52	9,02
IDCF50% - V	6,71	7,21
IDCF50% - P	8,38	7,87
IDCF50% - B	7,91	7,67
IDCE50% - A	7,44	11,87
IDCE50% - V	9,61	10,17
IDCE50% - P	7,48	11,04
IDCE50% - B	8,37	11,43

IP - Irrigação plena ao longo de todo o ciclo; IDR50% - Irrigação com déficit regular durante todo o ciclo; IDCV50% - Irrigação com déficit controlado na fase de crescimento vegetativo; IDCF50% - Irrigação com déficit controlado na fase de florescimento e formação dos grãos; IDCE50% - Irrigação com déficit controlado na fase de enchimento de grão; AM-NRS – área mínima para assegurar o nível de reprodução social, ha.

Fonte: Elaborado pelo Autor

A análise dos valores estimados de área mínima para assegurar o nível de reprodução social (AM-NRS) revela variações expressivas entre os tratamentos, refletindo o impacto direto das estratégias de irrigação e da aplicação de bioinsumos na viabilidade socioeconômica da produção, verificando-se que os sistemas de produção conforme IP - P e IDCF50% - A proporcionaram as menores áreas de produção necessárias para assegurar o NRS em 2023. No ano de 2024, os menores valores de área necessários para garantir a reprodução social da unidade produtiva foram observados nos tratamentos IP - A (6,86 ha) e IDCV50% - V (6,62 ha), evidenciando que tanto a irrigação plena com inoculação de *B.*

aryabhattai, quanto o uso da coinoculação em condições de déficit hídrico vegetativo, foram eficazes em assegurar maior retorno por hectare cultivado. Esses dados reforçam o papel estratégico dos bioinsumos, especialmente quando utilizados de forma combinada e em fases fenológicas menos sensíveis ao estresse hídrico. Por outro lado, os maiores valores de AM-NRS foram verificados nos tratamentos sob déficit em fase de enchimento de grãos e sem inoculação, chegando a exigir mais de 11 hectares para assegurar o NRS da família (como em IDCE50% - A), o que torna inviável a manutenção da unidade produtiva em pequenas áreas. Assim, a adoção de práticas sustentáveis, como a coinoculação de *B. aryabhattai* e *A. brasiliense*, associada a estratégias hídricas adequadas, se mostra fundamental não apenas para o incremento agronômico, mas também para a sustentabilidade econômica e social da agricultura no semiárido brasileiro.

5 CONCLUSÕES

A integração entre estratégias de irrigação deficitária controlada e o uso de bioinsumos pode contribuir para o manejo sustentável da cultura do milho em condições de semiárido. Verificou-se que a inoculação e a coinoculação com *Bacillus aryabhattai* e *Azospirillum brasiliense* apresentaram potencial para mitigar parcialmente os efeitos do déficit hídrico, sobretudo em fases específicas do desenvolvimento da cultura, ainda que com variações entre os ciclos avaliados. A adoção de déficits hídricos controlados mostrou-se viável sem comprometer significativamente o desempenho agronômico e fisiológico das plantas, reforçando a hipótese de que o manejo racional da irrigação, associado ao uso de bioinsumos, pode otimizar o uso da água e manter níveis adequados de produtividade.

A cultura do milho apresenta relevante plasticidade frente ao estresse hídrico em fases menos críticas do desenvolvimento, mantendo níveis satisfatórios de transpiração, condutância estomática e assimilação de CO₂ em estratégias de irrigação com déficit hídrico, indicando que o milho pode ajustar seu metabolismo como forma de tolerar restrições hídricas sem comprometer severamente a produtividade. No entanto, os efeitos da inoculação sobre essas variáveis se mostraram limitados e inconsistentes, particularmente no segundo ciclo, o que indica a necessidade de estudos adicionais para validar a eficácia dos bioinsumos testados, analisando tanto diferentes dosagens como horários de aplicação.

Os valores dos coeficientes de sensibilidade ao déficit (ky) apresentaram ampla variação entre os sistemas de produção e ciclos de cultivo. Levando-se em consideração, de forma adicional, os indicadores de renda líquida do agricultor, a área mínima para reprodução social da unidade de produção e por ter apresentado, em média, baixos valores de Ky, recomenda-se, em caso de restrição hídrica, manejar a irrigação conforme IDCV50% combinada com a coinoculação de *Bacillus aryabhattai* e *Azospirillum brasiliense*.

REFERÊNCIAS

- ABREU, L. P. S.; MARTINAZZO, A. P.; TEODORO, C. E. S.; BERBERT, P. A. Alternativa sustentável de uso de *Bacillus amyloliquefaciens* no biocontrole de fungos fitopatogênicos: uma revisão; **Revista de Ciências Ambientais**, v. 16, n. 1, 2022.
- ALMEIDA, A. C. S.; BONIFÁCIO, J.; PUSCH, M.; OLIVEIRA, F. C.; GESEINHOFF, L. O.; BISCARO, G. A. Produtividade e eficiência de uso da água em milho cultivado com diferentes estratégias de manejo hídrico. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 3, p. 1148-1457, 2017.
- ALVES, G. M. R. **Variabilidade genotípica de amendoim submetido ao estresse hídrico baseada em descritores bioquímicos**. 2013. 41 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias), Centro de Ciências Humanas e Agrárias, Universidade Estadual da Paraíba, 2013.
- AMORIM, E. P. R.; MELO, I. S. Ação antagônica de rizobactérias contra *Phytophthora parasitica* e *P. citrophthora* e seu efeito no desenvolvimento de plântulas de citros. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 24, p. 565-568. 2002.
- ANJOS, F. A.; FERRAZ, R. L. S.; AZEVEDO, C. A. V.; COSTA, P. S.; MELO, A. S.; RAMALHO, V. R. R. A. R. Relationship between physiology and production of maize under different water replacements in the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 1, p. 21-27, 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Atlas Irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. 2017.
- ANDRADE, E. M.; PEREIRA, O. J.; DANTAS, F. E. R. **Semiárido e o manejo dos recursos naturais: Uma proposta de uso adequado do capital natural**. Fortaleza: UFC, 2010. 408 p.
- ARAÚJO, V. S.; SOUSA, T. K. R.; NOBRE, R. S.; SANTOS, C. M.; NEGREIROS, K. K. S.; CARVALHO, A. C. C.; VELOSO, F. S.; VELOSO, R. C.; REZENDE, J. S. Influência da aplicação foliar de silício no desenvolvimento e produtividade do milho sob déficit hídrico no semiárido piauiense. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 5, e 25711528051, 2022.
- ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; GOMES, F. T.; SILVA, M. J.; JARDIM, A. M. F. R.; SIMÕES, V. J. L. P.; IZIDRO, J. L. P. S.; LEITE, M. L. M. V.; TEIXEIRA, V. I.; SILVA, T. G. F. Estresse hídrico em plantas forrageiras: Uma revisão. **Pubvet**, v. 13, n. 1, p. 1-10, 2019.
- ARMANHI, J. S. L.; SOUZA, R. S. C.; BIAZOTTI, B. B.; YASSITEPE, J. E. D. C. T.; ARRUDA, P. Modulating drought stress response of maize by a synthetic bacterial community. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 747541, 2021.
- ASHRY, N. M.; ALAIDAROS, B. A.; MOHAMED, A. S.; BADR, O. A. M.; EL-SAADONY, M. T.; ESMAEL, A. Utilization of drought-tolerant bacterial strains isolated from harsh soils as a plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): utilization of drought-tolerant bacterial strains. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 29, n. 3, p. 1760-1769, 2022.

AZEVEDO, B. M.; BOMFIM, G. V.; JOAQUIM RAIMUNDO DO NASCIMENTO NETO, J. R. N. N.; VINÍCIUS DE ARAÚJO VIANA, T. A. V.; VASCONCELOS, D. V. Irrigation depths and yield response factor in the productive phase of yellow melon. **Revista Brasileira de fruticultura**, v. 38, n. 4, 2016.

BÁRBARO, I. M.; MACHADO, P. C.; BÁRBARO JUNIOR, L. S.; TICELLI; M.; MIGUEL, F. B.; SILVA, J. A. A. Produtividade da soja em resposta a inoculação padrão e co-inoculação. **Colloquium Agrariae**, v. 5, n. 1, p. 1-7, 2009.

BASTOS, E. A.; CARDOSO, M. J.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; FÁBIO NUNES DO NASCIMENTO, F. N.; RAMOS, H. M. Desempenho da produtividade de espigas de milho verde sob diferentes regimes hídricos. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 16, n. 1, p. 94-108, 2017.

BATEMAN, H.; CURTIS, S.; MCADAM, K. **Dictionary of Agriculture**. Londres: A&C Black, 269 p., 2006.

BAZRGAR, A. G.; KALAT, A. S. M. N.; KHORASANI, B. S. K.; GHASEMI A. M.; KELIDARI, A. Effect of deficit irrigation on physiological, biochemical, and yield characteristics in three baby corn cultivars (*Zea mays* L.). **Heliyon**, v. 13 n. 9 (4), e15477, 2023.

BENJELLOUN, I.; ALAMI, I. T.; EL KHADIR, M.; DOUIRA, A.; UDUPA, S. M. Co-inoculation of *Mesorhizobium ciceri* with either *Bacillus* sp. or *Enterobacter aerogenes* on chickpea improves growth and productivity in phosphate-deficient soils in dry areas of a mediterranean region. **Plants**, v. 10, n. 3, p. 571, 2021.

BENSEN, M. R.; RIBEIRO, R. H.; GOETTEN, M.; FIOREZE, S. L.; GUGINKI-PIVA, C. A.; PIVA, J. T. Produtividade de milho e retorno econômico em sistema integrado de produção com doses de nitrogênio. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 19, n. 1, p. 94-103, 2020.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; COMIRAN, F.; BERGONCI, J. I.; MÜLLER, A. G.; FRANÇA, S.; SANTOS, A. O.; RADIN, B.; BIANCHI, C. M. M.; PEREIRA, P. G. Déficit hídrico e produtividade da cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, 2, p. 243-249. 2006.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; BERGONCI, J. I.; BIANCHI, C. A. M.; MÜLLER, A. G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 9, p. 831-839, 2004.

BERNINI, C. S.; SANTOS, F. A. Z.; SILVA, D. S.; FIGUEIREDO, Z. N. Seleção fenotípica de híbridos de milho para ambientes de baixa altitude e déficit hídrico. **Nativa**, v. 8, n. 2, p. 172-177, 2020.

BILIBIO, C.C.; JACINTO, A.C.; MARTINS, M.; REZENDE, F.C.; FREITAS, E.A.; GOMES, L.A.A. Desenvolvimento vegetativo e produtivo da berinjela submetida a diferentes tensões de água no solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 7, p. 730-735, 2010.

BRASIL. Decreto Federal nº 10.375, de 26 de maio de 2020. Institui o Programa Nacional de Bioinsumos e o Conselho Estratégico do Programa Nacional de Bioinsumos.

CANO-LAMADRID, M.; GIRÓN, L.; PLEITE, R.; BURLÓ, F.; CORELL, M.; MORIANO, A. Quality attributes of table olives as affected by regulated deficit irrigation. **LWT. Food Science and Technology**, v. 62, n. 1, p. 19-26, 2015.

CASSÁN, F.; VANDERLEYDEN, J.; SPAEPEN, S. Physiological and agronomical aspects of phytohormone production by model plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR) belonging to the genus *Azospirillum*. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 33, n. 2, p. 440-459, 2014.

CASSÁN, F; DIAZ-ZORITA, M. *Azospirillum* sp. in current agriculture: From the laboratory to the field. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 103, n. 10, p. 117-130, 2016.

CHAI, Q.; GAN, Y.; ZHAO, C.; XU, H. Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 36, n. 3, 2016.

CHAVES, M. M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of Botany**, v. 103, n. 4, p. 551-560, 2009.

COÊLHO, Jackson Dantas. MILHO PRODUÇÃO E MERCADO: v. 8 n. 291 (2023). **Caderno Setorial ETENE**, Fortaleza, v. 8, 2024. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/revista/cse/article/view/2657>. Acesso em: 26 jun. 2025.

COHEN, A.C.; BOTTINI, R.; PONTIN, M.; BERLI, F.J.; MORENO, D; BOCCANLANDRO, H; TRAVAGLIA, CN; PICCOLI, PN. *Azospirillum brasiliense* ameliorates the response of *Arabidopsis thaliana* to drought mainly via enhancement of ABA levels. **Physiologia Plantarum**, v. 153, n. 1, p. 79-90, 2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira. Boletim da Safra 2023/2024, v. 11, n. 12, p. 117, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acessado em: 18 nov. 2024.

CONDON, A. G.; RICHARDS, R. A.; REBETZKE, G. J.; FARQUHAR, G. D. Breeding for high water-use efficiency. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 407, p. 2447-2460, 2004.

COTRIM, C. E.; COELHO, E. F.; SILVA, J. A.; SANTOS, M. R. Irrigação com déficit controlado e produtividade de mangueira 'Tommy Atkins' sob gotejamento. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, p. 2229-2238, 2017.

CRUZ, J. C; PEREIRA FILHO, I. A.; ALVARENGA, R. C.; GONTIJO NETO, M. M.; VIANA, J. H. T. M.; OLIVEIRA, M. F.; MATRANGOLO, W. J. R.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R. **Cultivo do milho**. Ed. 6. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010.

DAMASCENO, N. P.; KHAN, A. S.; LIMA, P. V. P. S. O Impacto do Pronaf sobre a Sustentabilidade da Agricultura Familiar, Geração de Emprego de Renda no Estado do Ceará. **RESR**, v. 49, n. 1, p. 129-156, 2011.

DAVIES, W. J. J.; ZHANG, J.; YANG; DODD, I. C. Novel crop science to improve yield and resource use efficiency in water-limited agriculture. **Journal of Agricultural Science**, v. 149, p. 123-131, 2011.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1979.

DUARTE, E. C. C.; GONÇALVES, A. C. M.; TORRES, M. N. N.; SIMPLÍCIO, S. F.; RIBEIRO, R. X.; SOUZA, R. F.; SOUZA JÚNIOR, S. P. Manejo de herbicidas no controle de plantas daninhas e sua influência no crescimento e produção do milho híbrido AG 1051. **AGROTEC**, v. 37, n. 1, p. 71-80, 2016.

DUARTE, J. P.; RUFF, O. J.; SANTOS, C. L. R. Inoculação de milho com inoculante à base de *Azospirillum brasiliense* sob doses de nitrogênio em solo arenoso. **Scientific Electronic Archives**, v. 14, n. 8, 2021.

EL SABAGH, A.; BARUTÇULAR, C.; ISLAM, M. S. Relationships between stomatal conductance and yield under deficit irrigation in maize (*Zea mays* L.). **Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences**, v. 5, n. 1, p. 14-21, 2017.

EMBRAPA. **Bactéria encontrada no mandacaru vira bioproduto que promove tolerância à seca em plantas**. 2021.

FANCELLI, A. L. **Boas práticas para o uso eficiente de fertilizantes na cultura do milho**. Piracicaba: IPNI - International Plant Nutrition Institute Brazil, 2010. 16 p. (IPNI. Informações Agronômicas, 131); 2010.

FERNANDES, V. L. B. **Recomendações de adubação e calagem para o estado do Ceará**. Fortaleza, CE: UFC, 1993. 248 p.

FERRARI, E.; PAZ, A.; SILVA, A. C. Déficit hídrico no metabolismo da soja em semeaduras antecipadas no Mato Grosso. **Nativa**, v. 3, n. 1, p. 67-77, 2015.

FLEXAS, J. *et al.* Mesophyll conductance to CO₂: an unappreciated central player in photosynthesis. **Plant Science**, v. 193-194, p. 70-84, 2013.

FLEXAS, J.; MEDRANO, H. Drought-inhibition of photosynthesis in C3 plants: stomatal and non-stomatal limitations revisited. **Annals of Botany**, v. 89, n. 2, p. 183-189, 2002.

FLEXAS, J.; BOTA, F.; LORETO, G.; CORNIC, T.; SHARKEY, D. Diffusive and Metabolic Limitations to Photosynthesis under Drought and Salinity in C3 Plants. **Plant Biology**, v. 6, n. 3, p. 269-279, 2006.

FORNASIERI FILHO, D. **Manual da cultura do milho**. Jaboticabal, Funep, 576 p., 2007.

FUKAMI, J.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S.; HUNGRIA, M. Acessing inoculation methods of maize and wheat with *Azospirillum brasiliense*. **AMB Express**, v 6, p. 61-13, 2016.

GALVÃO, J. C. C.; BORÉM, A.; PIMENTEL, M. A. **Milho: do plantio à colheita**. 2^a ed. Viçosa: UFV, 2017.

GAVA, R.; FRIZZONE, J. A.; SNYDER, R. L.; JOSE, J. V.; FRAGA JUNIOR, E. F.; PERBONI, A. Estresse hídrico em diferentes fases da cultura da soja. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 9, n. 6, p. 349-359, 2015.

GAVILANES, F. Z.; ANDRADE, S. S.; ZUCARELI, C.; YUNES, J. S.; AMARAL, H.; COSTA, R. M.; RAIA, D.; GARCIA, M.; GUIMARÃES, M. F. Efecto de la inoculación con cianobacterias y coinoculación con *Azospirillum brasiliense* sobre características fitométricas en maíz. **Bioagro**, v. 31, n. 3, p. 193-202, 2019.

GOES, G. F.; SOUSA, G. G.; SANTOS, S. O.; SILVA, F. B.; CEITA, E. D. A. R.; LEITE, K. N. Produtividade da cultura do amendoim sob diferentes supressões de irrigação com água salina. **Irriga**, v. 26, n. 2, p. 210-220, 2021.

GUIDINELLE, R. B. **Bioinsumos na cultura do milho: interações com manejo do solo e água**. 2023. 115f. (Tese de Doutorado) - Universidade Federal do Espírito Santo, 2023.

GUIMARÃES, P. S.; ROCHA, D. S.; PATERNIZANI, M. E. A. G. Z. Conteúdo de carboidrato foliar em híbridos de milho submetidos à restrição hídrica. **Evidência**, v. 19, n. 2, p. 93-112, 2019.

HAMID, B.; ZAMAN, M.; FAROOQ, S.; FÁTIMA, S.; SAYYED, R. Z.; BABA, Z. A., SHEIKH, T. A.; REDDY, M. S.; ENSHASY, H. E.; GAFUR, A.; SURIANI, N. L. Bioestimulantes bacterianos para plantas: uma forma sustentável de melhorar o crescimento, a produtividade e a saúde das culturas. **Sustentabilidade**, v. 13, n. 5, p. 2856, 2021.

HAYASHI, R.; DOGLIOTTI, S. Water productivity in maize, at different levels of deficit irrigation in humid climate. **Agrociencia Uruguay**, v. 25, n. 1, 2021.

HUNGRIA, M. **Inoculação com *Azospirillum brasiliense*: inovação em rendimento a baixo custo**. Londrina [EMBRAPA Soja], 38 p. (Documentos 325), 2011.

İŞIK, M.; ORTAŞ, İ. Effect of Biochar and Mycorrhiza Inoculation on Maize Growth, Photosynthesis Activity, and Water Use Efficiency Under Deficient Irrigation Conditions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 55, n. 19, p. 2952-2965, 2024.

ISTANBULLUOGLU, A. Effects of irrigation regimes on yield and water productivity of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under Mediterranean climatic conditions. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, n. 12, p. 1792-1798, 2009.

JUNIOR BASSETTO, N.; ALVES, G. H. T.; BELLETTINI, S.; BELLETTINI, N. M. T. Nitrogen splitting and seed inoculation with *Azospirillum Brasilense* in corn culture. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 89544-89663, 2020.

KAPPES, C.; ARF, O.; ARF, M. V.; FERREIRA, J. P.; BEM, E. A. D.; PORTUGAL, J. R.; VILELA, R. G. Inoculação de sementes com bactéria diazotrófica e aplicação de nitrogênio em cobertura e foliar em milho. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 2, p. 527-538, 2013.

KAVAMURA, V. N.; SANTOS, S. N.; SILVA, J. L.; PARMA, M. M.; ÁVILA, L. A.; VISCONTI, A.; ZUCCHI, T. D.; TAKETANI, R. G.; ANDREOTE, F. D.; MELO, I. S. Screening of Brazilian cacti rhizobacteria for plant growth promotion under drought. **Microbiological Research**, v. 168, p. 183-191, 2013.

KAVAMURA, V. N.; SANTOS, S. N.; TAKETANI, R. G.; VASCONCELLOS, R. L. F.; MELO, I. S. Draft genomes sequence of plant growth-promoting drought tolerant *Bacillus* sp. Strain CMAA 1363 isolated from the Brazilian caatinga biome. **Genome Announcements**, v. 5, n. 5, p. e01534-16, 2017.

KAZI, N.; DEAKER, R.; WILSON, N.; MUHAMMAD, K.; TRETHOWAN, R. The response of wheat genotypes to inoculation with *Azospirillum brasiliense* in the field. **Field Crops Research**, v. 196, p. 368-378. 2016.

KOHLER, J.; HERNÁNDEZ, J. A.; CARAVACA, F.; ROLDÁN, A. Plant-growth-promoting rhizobacteria and arbuscular mycorrhizal fungi modify alleviation biochemical mechanisms in water-stressed plants. **Functional Plant Biology**, v. 35, n. 2, p. 141-151, 2008.

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. 184f. Tese (Doutorado em agricultura tropical e subtropical) - Instituto Agronômico, Campinas-SP, 2019.

LEE, S.; KA, J.; SONG, H. G. Growth Promotion of *Xanthium italicum* by Application of Rhizobacterial Isolates of *Bacillus aryabhatti* in Microcosm Soil. **The Journal of Microbiology**, v. 50, n. 1, p. 45-49, 2012.

LOPES, E. A. P.; SILVA, A. D. A.; MERGULHÃO, A. C. E. S.; SILVA, E. V. N.; SANTIAGO, A. D.; FIGUEIREDO, M. V. B. Co-inoculation of growth promoting bacteria and *Glomus clarum* in micropropagated cassava plants. **Revista Caatinga**, v. 32, p. 152–166, 2019.

MACHADO, R. W. B; CALVI, V. O.; PACCOLA, E. A. S.; SCHMDIT FILHO, E.; GASPAROTTO, F. Inoculação foliar de plantas de milho com *Bacillus subtilis* e *Azospirillum brasiliense*. **Revista Encyclopédia Biosfera**, v. 17, n. 34, p. 289, 2020.

MAGALHAES, P. C.; SOUZA, T. C. de. **Cultivo do Milho: Ecofisiologia**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 8 ed., 18 p., 2011, (Sistema de Produção, 1).

MANDAL, S.; ANAND, U.; LÓPEZ-BUCIO, J.; KUMAR, M.; LAL, M. K.; TIWARI, R. K.; DEY, A. Biostimulants and environmental stress mitigation in crops: A novel and emerging approach for agricultural sustainability under climate change. **Environmental Research**, p. 116357, 2023.

MARIANO, R. L. R.; SILVEIRA, E. B.; ASSIS, S. M. P.; GOMES, A. M. D.; NASCIMENTO, A. R. P.; DONATO, V. M. T. S. Importância de bactérias promotoras de crescimento e de biocontrole de doenças de plantas para uma agricultura sustentável. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica**, v. 1, p. 89-111, 2004.

MARQUES, H. M. C.; CORDEIRO, E. C. N.; AMATUSSI, J. O.; LARA, G. B.; MÓGOR, G.; NEDILHA, L. C. B. M.; MÓGOR, Á. F. Mitigação dos efeitos da restrição hídrica em soja com biofertilizante: alterações metabólicas e de condutância estomática. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, e11101119377, 2021.

MARTINS, J. D.; PETRY, M. T.; RODRIGUES, G. C.; CARLESSO, R. Viabilidade econômica da irrigação deficitária em milho irrigado por gotejamento. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 150-165, 2016.

MENG, F.; ZHANG, J.; YAO, F.; HAO, C. Interactive Effects of Elevated CO₂ Concentration and Irrigation on Photosynthetic Parameters and Yield of Maize in Northeast China. **Plos One**, v. 9, n. 8, e105898, 2014.

MIRANDA, R. A; DUARTE, J. O; GARCIA, J. C. de. **Cultivo do Milho: Economia da Produção**. Embrapa Milho e Sorgo, 7 ed., 13 p., 2012. (Sistema de Produção, 1).

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: UFLA, 2006.

NASCIMENTO, F. N.; BASTOS, E. A.; CARDOSO, M. J.; JÚNIOR, A. S. A.; RIBEIRO, V. Q. Parâmetros fisiológicos e produtividade de espigas verdes de milho sob diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira Milho Sorgo**, v. 14, p. 167-181, 2015.

NIU, J.; CHEN, F.; MI, G.; LI, C.; ZHANG, F. Transpiration, and Nitrogen Uptake and Flow in Two Maize (*Zea mays* L.) Inbred Lines as Affected by Nitrogen Supply. **Annals of Botany**, v. 99, n. 1, p. 153-160, 2006.

NOGUEIRA, D. B.; SILVA, A. O.; GIROLDO, A. B.; SILVA, A. P. N.; COSTA, B. R. S. Dry spells in a semi-arid region of Brazil and their influence on maize productivity. **Journal of Arid Environments**, v. 209, p. 104892, 2023.

NOGUEIRA, D. B.; SILVA, A. O.; SOUSA, A. M.; COSTA, B. R. S.; PUTTI, F. F. Cropping calendar, agroclimatic and agroecological zoning for rainfed maize (*Zea mays* L.) under different rainfall scenarios in a semi-arid region of Brazil. **Crop & Pasture Science**, v. 75, p. 1-12, 2024.

NOVO, L. A. B.; CASTRO, P. M. L; ALVARENGA, P.; DA SILVA, E. F. Plant growth-promoting rhizobacteria-assisted phytoremediation of mine soils. **Bio-geotechnologies for Mine Site Rehabilitation**. Elsevier, v. 16, p. 281-295, 2018.

OLIVEIRA, E.; MELO, H.C.; TRINDADE, K.L.; GUEDES, T.M.; SOUSA, C.M. Morfofisiologia e produção de milho-verde cultivado sob diferentes lâminas de água e doses de nitrogênio nas condições do cerrado goiano, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 10, e 6179108857, 2020.

OLIVEIRA, I. J.; FONTES, J. R. A.; PEREIRA, B. F. F.; MUNIZ, A. W. Inoculation with *Azospirillum brasiliense* increases maize yield. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 5, p. 1-9, 2018.

PACHECO, C. A. P. **BRS2022: Hídrico Duplo de Milho**. Comunicado Técnico, EMBRAPA, 2009.

PIATI, G. L.; LIMA, S. F.; SOBRINHO, R. L.; SANTOS, O. F., VENDRUSCOLO, E. P., OLIVEIRA, J. J.; ARAÚJO, T. A. N.; ALWUTAYD, K. M.; FINATTO, T.; ABDELGAWAD, H. Biostimulants in Corn Cultivation as a Means to Alleviate the Impacts of Irregular Water Regimes Induced by Climate Change. **Plants**, v. 12, n. 13, p. 2569, 2023.

PIMENTEL, C. **A relação da planta com a água**. Seropédica, RJ: Edur., 191 p: il., 2004.
 PINTO, C. M.; TÁVORA, F. J. A. F.; PINTO, O. R. O. Relações hídricas, trocas gasosas em amendoim, gergelim e mamona submetidos a ciclos de deficiência hídrica. **Revista Agropecuária Técnica**, v. 35, n.1, p. 31-40, 2014.

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.

REDDY, A. R.; CHAITANYA, K. V.; VIVEKANANDAN, M. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. **Journal of Plant Physiology**, v. 161, n. 11, 1189-1202, 2004.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. **Como a planta de milho se desenvolve**. Piracicaba: Potafos. Informações agronômicas, 20 p., 2003.

SANTOS, M. R.; DONATO, S. L. R.; ARANTES, A. M.; COELHO, E. F.; OLIVEIRA, P. M. Gas exchange in 'BRS Princesa' banana (*Musa spp.*) under partial rootzone drying irrigation in the north of Minas Gerais, Brazil. **Acta Agronomica**, v. 66, p. 378, 2017.

SANTOS, M. R.; DONATO, S. L. R.; COELHO, E. F.; ARANTES, A. M.; COELHO FILHO, M. A. Irrigação lateralmente alternada em lima ácida 'Tahiti' na região norte de Minas Gerais. **Irriga**, v. 1, p. 71-88, 2016.

SANTOS, M. R.; MARTINEZ, M. A.; DONATO, S. L. R.; COELHO, E. F. Produtividade e fotossíntese da mangueira 'Tommy Atkins' sob déficit hídrico em região semiárida da Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 899- 907, 2014.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.

SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Outstanding impact of *Azospirillum brasiliense* 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.

SHIVAJI, S.; CHATURVEDI, P.; BEGUM,Z.; PINDI, P.K.; MANORAMA,R.; PADMANABAN, D. A.; SHOUCHE, Y. S.; PAWAR, S.; VAISHAMPAYAN, P.; DUTT, C. B. S.; DATTA, G. N.; MANCHANDA, R. K.; RAO, U. R.; BHARGAVA, P. M.; NARLIKAR, J. V. *Janibacter hoylei* sp nov., *Bacillus isronensis* sp nov and *Bacillus aryabhattai* sp nov., isolated from cryotubes used for collecting air from the upper atmosphere. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, v. 59, p. 2977-2986. 2009.

SILVA, M. A.; JIFON, J. L.; SILVA, J. A. G.; SANTOS, C. M.; SHARMA, V. Relationships between physiological traits and productivity of sugarcane in response to water deficit. **Journal of Agricultural Science**, v. 152, 2013.

SILVA NETO, B. Objetivos e Aspectos Metodológicos dos Estudos Municipais. In: Silva Neto, B.; Basso, D. (Org.). **Sistemas agrários do Rio Grande do Sul: análise e recomendações políticas**. Ijuí: Ed. Unijuí, 2005. p. 159-163.

SILVA, S.; SOUSA, A. C. P.; SILVA, C. S.; ARAÚJO, E. R.; SOARES, M. A. S.; TEODORO, I. Parâmetros produtivos do milho sob déficit hídrico em diferentes fases fenológicas no semiárido brasileiro. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 30-41, 2021.

SILVA, V. G. F.; ANDRADE, A. P.; FERNANDES, P. D.; SILVA, E. F.; AZEVEDO, C. A. V.; ARAÚJO, J. S. Productive characteristics and water use efficiency in cotton plants under different irrigation strategies. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 5, p. 451-457, 2010.

SOARES, L. A. A.; FERNANDES, P. D.; LIMA, G. S.; SUASSUNA, J. F. PEREIRA, R. F. Gas exchanges and production of colored cotton irrigated with saline water at different phenological stages. **Revista Ciência Agronômica**, v. 49, n. 2, 2018.

SOUSA, H. C.; SOUSA, G. G.; VIANA, T. V. A.; PEREIRA, A. P. A.; LESSA, C. I. N.; SOUZA, M. V. P.; GUILHERME, J. M. S.; GOES, G. F.; ALVES, F. G. S.; GOMES, S. P.; SILVA, F. D. B. *Bacillus aryabhattai* mitigates the effects of salt and water stress on the agronomic performance of maize under an agro-ecological system. **Agriculture**, n. 13, p. 1150, 2023.

SOUSA, S. M.; OLIVEIRA, C. A.; ANDRADE, D. L.; CARVALHO, C. G.; RIBEIRO, V. P.; PASTINA, M. M.; MARRIEL, I. E.; LANA, U. G. P.; GOMES, E. A. P. Tropical *Bacillus* strains inoculation enhances maize root surface area, dry weight, nutrient uptake and grain yield. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 40, p. 867-877, 2021.

SOUZA, L.S.B.; MOURA, M.S.B.; SEDIYAMA, G.C.; SILVA, T.G.F. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura do milho e feijão-caipi em sistemas exclusivo e consorciado. **Revista Caatinga**, v. 28, n.4, p.151-160, 2015.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 954 p

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre: Rio Grande do Sul, 888 p., 2017.

TARRAND, J. J.; KRIEG, N. R.; DÖBEREINER, J. A taxonomic study of the *Spirillum* lipoferum group, with descriptions of a new genus, *Azospirillum* gen. nov. and two species, *Azospirillum lipoferum* (Beijerinck) comb. nov. and *Azospirillum brasiliense* sp. nov. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 24, p. 967-980, 1978.

TASHAYO, B.; HONARBAKSH, A.; AKBARI, M; EFTEKHARI, M. Land suitability assessment for maize farming using a GIS-AHP method for a semi- arid region, Iran. **Journal Of The Saudi Society Of Agricultural Sciences**, v. 19, n. 5, p. 332-338, 2020.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**, editores técnicos. – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2017.

VISHNUPRADEEP, R.; BRUNO, L.B.; TAJ, Z.; KARTHIK, C.; HALLABATHULA, D.; KUMAR, A.; FREITAS, H.; RAJKUMAR, M. Bactérias promotoras do crescimento vegetal melhoram o potencial de crescimento e fitoestabilização de *Zea mays* sob cromo e estresse hídrico, alterando as respostas fotossintéticas e antioxidantes. **Tecnologia Ambiental e Inovação**, v.25, p.102154, 2022.

VITTO, D. C.; **Interação entre bactérias promotoras de crescimento vegetal e fertilização com cama de frango na cultura do milho**; MARECHAL CÂNDIDO RONDON – PARANÁ 2023.

VURUKONDA, S. S. K. P.; VARDHARAJULA, S.; SHRIVASTAVA, M.; ALI S. K. Z. Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. **Microbiological Research**, v. 184, p. 13-24, 2016.

ZHANG, F.; GUO, S.; ZHANG, C.; GUO, P. An interval multiobjective approach considering irrigation canal system conditions for managing irrigation water. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.]. v. 211, p. 293-302, 2019.

ZHANG, L., LI, S. Effects of nitrogen and potassium on photosynthetic characteristics in summer maize leaves under long-term water stress. **Journal of Plant Nutrition and Fertilizers**, v. 15, n. 1, p. 82-90, 2009.

ZUAZO, V. H. D.; GARCÍA-TEJERO, I. F.; RODRÍGUEZ, B. C. Deficit irrigation strategies for subtropical mango farming. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 41, n.13. p.01-22, 2021.