



PREFEITURA DE
CAMPOS

SECRETARIA MUNICIPAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA
E TECNOLOGIA

 Mais
Ciência

AVALIAÇÃO DO ESTRESSE TÉRMICO EM PLANTAS DE MILHO-PIPOCA INOCULADAS COM RIZOBACTÉRIAS EM CONDIÇÕES DE LIMITAÇÃO HÍDRICA

Orientador: Eliemar Campostrini
Bolsista: Kauê Cabral Hygino Velasco

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
2022/2023



SUMÁRIO

RESUMO	3
INTRODUÇÃO	4
REVISÃO DA LITERATURA.....	5
Mudanças climáticas provocadas pelo aumento da temperatura e seus impactos no equilíbrio térmico das plantas.....	5
Consequências fisiológicas do estresse extremo em plantas.....	6
Aplicação da fluorescência da clorofila como método de identificação de estresse em plantas.....	7
METODOLOGIA.....	8
Localização, condições e material do ensaio	8
Avaliação de termografia por infravermelho e de fluorescência.....	9
Biomassa das folhas e raízes	10
Eficiência fotoquímica	10
RESULTADOS E DISCUSSÃO	11
Variáveis analisadas através da fluorescência de clorofila	17
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

RESUMO

A adequação dos níveis de temperatura e disponibilidade de água é de suma importância para o cultivo de plantas, mas pode representar um grande desafio quando não atende às necessidades específicas das plantas. As mudanças climáticas têm se tornado cada vez mais problemáticas, exigindo o desenvolvimento de novas tecnologias que possam mitigar os danos causados às plantações. Neste projeto, buscou-se enfrentar esse desafio por meio da inoculação de rizobactérias promotoras de crescimento vegetal (PGPR) em plantas de milho-pipoca UENF WS01 [*Zea mays* L. var. *everta* (Sturtev.) L. H. Bailey]. Nosso objetivo foi avaliar o estresse térmico em plantas de milho-pipoca inoculadas com rizobactérias em condições de limitação hídrica e comparar com plantas não inoculadas, a fim de quantificar a redução dos danos causados pelo estresse térmico devido à inoculação de PGPR. Para realizar essas avaliações, utilizamos o FluorCam para obter imagens de fluorescência de clorofila em células individuais, bem como um termógrafo de infravermelho para medir os efeitos da limitação hídrica do solo nos processos fisiológicos, como fotossíntese, respiração e transpiração. Além disso, analisamos a eficiência fotoquímica e a partição de fotoassimilados do cultivar UENF WS01 em associação com PGPR. Com essas abordagens, obteve-se informações valiosas sobre como a inoculação de rizobactérias promotoras de crescimento vegetal pode ajudar a minimizar os efeitos adversos do estresse térmico e da limitação hídrica nas plantas de milho-pipoca. Essa pesquisa é crucial para desenvolver estratégias eficazes de manejo agrícola que garantam a produção sustentável de culturas, mesmo diante das adversidades climáticas cada vez mais frequentes.

Palavras-chave: temperatura; crescimento; condições; tecnologia; PGPR.

INTRODUÇÃO

O estresse térmico é uma medida utilizada para avaliar em que medida a planta está enfrentando condições desfavoráveis em relação à temperatura, e está diretamente relacionado ao estresse hídrico, que quantifica o nível de dano causado à planta devido à escassez ou dificuldade de absorção de água (Turner, 1981; Durães et al., 2004). Em Campos dos Goytacazes, o estresse hídrico associado ao estresse térmico representa um dos maiores desafios que afetam o crescimento e a produção vegetal. Cerca de 50% dos municípios brasileiros (2.783) decretaram Emergência ou Estado de Calamidade Pública devido à seca pelo menos uma vez entre 2003 e 2016 (ANA, 2017). Estima-se que até 2050, mais de 50% das terras aráveis enfrentarão sérios problemas no crescimento das plantas devido à seca, o que pode levar a uma grave escassez mundial de alimentos. A situação climática de Campos dos Goytacazes é tão crítica que existe uma tentativa de reclassificar o tipo de clima da região de tropical para semiárido, a fim de fornecer suporte aos agricultores locais e atenuar as perdas nas plantações (MARIANA, 2022).

Diante desses desafios, o objetivo deste projeto é oferecer aos agricultores uma opção de cultivo mais adaptada às condições climáticas de seca e clima quente da região norte fluminense, através da associação do milho-pipoca com rizobactérias que promovam seu crescimento. As rizobactérias são microrganismos associados às raízes das plantas, desempenhando diversas funções benéficas, como promover o crescimento vegetal, atuar como agentes de controle biológico e induzir resistência contra os fatores abióticos, inclusive auxiliando na mitigação do estresse térmico (De Lima et al., 2019; Ullah et al., 2019). Neste projeto buscou-se identificar uma bactéria compatível com a espécie de milho-pipoca que proporcione o maior crescimento possível. O projeto também visou avaliar a resposta do genótipo UENF WS01 de milho-pipoca inoculado e não inoculado com PGPR sob condições contrastantes de disponibilidade hídrica, gerando informações inovadoras que possibilitem a formulação de um pacote biotecnológico, unindo a escolha da cultivar ideal com a aplicação de PGPR. Por fim, foram analisadas as respostas ecofisiológicas do cultivar UENF WS01, tanto inoculado quanto não inoculado com PGPR, na presença ou ausência do estresse

hídrico do solo.

REVISÃO DA LITERATURA

Mudanças climáticas provocadas pelo aumento da temperatura e seus impactos no equilíbrio térmico das plantas.

As mudanças climáticas globais têm trazido sérias consequências para o crescimento e desenvolvimento das culturas em todo o mundo. O desequilíbrio na distribuição das chuvas e o considerável aumento das temperaturas médias anuais são os principais fatores que afetam negativamente as plantas, resultando em diversos comprometimentos morfofisiológicos, como demonstrado em estudos de Kadam et al. (2014), Fahad et al. (2017) e Raza et al. (2019) que têm destacado os impactos causados por esses fatores ambientais nas plantas.

De acordo com os dados do IPCC (2018), desde meados do século XX, a temperatura média global do ar tem apresentado um aumento significativo de 0,85°C até 2012. No entanto, em muitas regiões, especialmente aquelas mais afetadas pelo aquecimento global, esse aumento tem chegado próximo a 1,5°C, com previsões de acréscimo de até 0,2°C por década. Esses pequenos aumentos têm causado grandes mudanças em sistemas humanos e naturais, incluindo eventos mais frequentes de secas, inundações, elevação do nível do mar e perda de biodiversidade, o que afeta diretamente o desenvolvimento socioeconômico de diversas regiões (IPCC, 2018).

Além dos impactos diretos nos ecossistemas naturais, o aumento das temperaturas médias globais está fortemente associado à redução da segurança alimentar em escala mundial (Lesk et al., 2016). Esse efeito ocorre porque o estresse térmico gerado pelas altas temperaturas compromete a produção agrícola, seja por meio do impacto direto das ondas de calor nas áreas de cultivo, ou devido à maior ocorrência de eventos extremos de secas e inundações nessas regiões (Lobell et al., 2011; Noreen Zahra et al., 2023).

A intensidade do estresse e os danos resultantes estão relacionados às

características específicas de cada espécie vegetal, ao local onde ela cresce e se desenvolve, bem como à duração do período sob condições estressantes (Żróbek-Sokolnik, 2012; Cavatte et al., 2012). O estresse térmico, quando a temperatura ultrapassa os limites tolerados pelas plantas por um período prolongado, pode causar danos irreversíveis ao crescimento e desenvolvimento das mesmas (Wahid et al., 2007).

Consequências fisiológicas do estresse extremo em plantas

O estresse térmico, seja por temperaturas muito baixas ou muito altas, pode resultar em diversos problemas funcionais nos tecidos das plantas. A intensidade da temperatura e o tempo de exposição a ela desempenham um papel crucial nos distúrbios que as plantas enfrentam nessas condições. Temperaturas moderadamente altas ou excessivamente altas (supra-ótimas) podem levar à desnaturação ou agregação de proteínas, aumento da fluidez das membranas lipídicas, inativação de enzimas cloroplastídicas e mitocondriais, inibição da síntese de proteínas e ruptura das membranas celulares. Esses efeitos causam danos graves às células e podem, em última instância, resultar em morte celular (Wahid et al., 2007; Hasanuzzaman et al., 2013).

Um dos processos fisiológicos mais afetados pelo estresse térmico é a fotossíntese (Yang et al., 2006). Tanto as reações fotoquímicas nos tilacoides dos cloroplastos quanto as reações bioquímicas que ocorrem no estroma são altamente sensíveis a temperaturas supra-ótimas. A redução na taxa fotossintética ocorre devido à diminuição da fixação de CO₂ e sua conversão em carboidratos, principalmente devido à redução na atividade da enzima RuBisCO (Crafts-Brandner e Salvucci, 2004). Temperaturas moderadamente altas podem inativar a RuBisCO por meio da inibição da RuBisCO ativase (RCA), levando à redução na assimilação do CO₂ e aumento da taxa de oxigenação, resultando em fotorrespiração. Esse processo metabólico é uma estratégia fisiológica que as plantas usam para escapar do estresse ambiental (Portis, 2003; Perdomo et al., 2017).

O fechamento dos estômatos também é um mecanismo de resposta das plantas ao

estresse térmico, reduzindo a entrada de CO₂ e a transpiração para evitar a perda excessiva de água (Salvucci e Crafts-Brandner, 2002; Morales et al., 2003). No entanto, esse fechamento dos estômatos também diminui a entrada de CO₂ no mesofilo, o que pode agravar ainda mais a fotorrespiração da RuBisCO. Além disso, a afinidade da RuBisCO com o CO₂ é reduzida em temperaturas mais altas, favorecendo a oxigenação em detrimento da carboxilação (Hermida-Carrera et al., 2016).

O estresse térmico também causa danos às estruturas dos cloroplastos, como o desempilhamento de tilacoides granais e aumento da fluidez dos lipídios das membranas, essas alterações afetam a eficiência da fotossíntese, pois reduzem a quantidade de pigmentos fotossintéticos e prejudicam a transferência de energia de excitação para a manutenção do fluxo de elétrons no PSII. (Vani et al., 2001; Ashraf e Hafeez, 2004; Rodriguez et al., 2005; Millineaux e Kirchhoff, 2009; Petrova et al., 2018).

Além disso, o estresse térmico provoca a formação excessiva de espécies reativas de oxigênio (EROs), que são prejudiciais às proteínas do centro de reação do PSII. Essas EROs podem sinalizar a ativação do ciclo de reparo do PSII sob estresse moderado, mas tornam-se extremamente tóxicas e destrutivas para as células vegetais com o agravamento do estresse térmico (Reddy et al., 2004; Asada, 2006; Dogra e Kim, 2019; Hu et al., 2020).

Aplicação da fluorescência da clorofila como método de identificação de estresse em plantas.

A técnica de medição da fluorescência da clorofila a (FC) tem se mostrado amplamente empregada na detecção de estresse em plantas. Sua precisão, rapidez e característica não invasiva a tornam um método eficaz para quantificar os danos causados ao aparato fotoquímico, seja por estresses abióticos ou bióticos (Baker, 2008; Woo et al., 2008). Em linhas gerais, a análise da FC da clorofila a visa avaliar e estimar a atividade geral do PSII (Guidi et al., 2007; Ehlert e Hinch, 2008; Kalaji et al., 2017).

A emissão de fluorescência da clorofila é uma das três principais vias de dissipação

de energia luminosa que foi absorvida pelas plantas, sendo a energia absorvida pelos complexos coletores de luz do PSII e do PSI usada pela etapa fotoquímica ou reemitida na forma de calor e/ou luz, ou seja, a fluorescência. Como essas três vias de dissipação são competitivas, a intensidade de fluorescência emitida está inversamente relacionada à energia destinada à etapa fotoquímica e à dissipação na forma de calor. Essa característica permite que a FC seja utilizada como uma técnica para avaliar a atividade fotossintética das plantas (Baker, 2008; Guidi e Degl'Innocenti, 2011; Murchie e Lawson, 2013).

Existem duas abordagens principais para medir a fluorescência da clorofila: a fluorescência não-modulada ou de excitação contínua e a fluorescência modulada. Na primeira abordagem, as medições são feitas após a adaptação da amostra ao escuro, e a fluorescência é detectada após a iluminação com um pulso de saturação. Já na fluorescência modulada, a medição é realizada com base no sistema de modulação de amplitude de pulso (PAM), onde a fluorescência variável induzida na amostra é monitorada pelo detector, permitindo medições em amostras sob exposição contínua à luz ativa (Baker, 2008; Murchie e Lawson, 2013; Goltsev et al., 2016).

Outra forma de aprimorar a medição da fluorescência é por meio da fluorescência por imagem, que permite estudar a heterogeneidade na lâmina foliar e avaliar alterações simultâneas em muitas amostras, sendo de grande utilidade para a fenotipagem de plantas e a detecção precoce de estresse (Barbagallo et al., 2003; Baker, 2008; Rühle et al., 2018). O uso de imagens de fluorescência também pode identificar heterogeneidades fisiológicas, como a abertura estomática diferencial, que podem ser causadas por estresses em plantas (Oxborough, 2004; Guidi e Degl'Innocenti, 2011; Gorbe e Catalayud, 2012; Sanchez-Moreiras et al., 2020).

METODOLOGIA

Localização, condições e material do ensaio

O experimento foi conduzido na casa de vegetação da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), localizada em Campos dos Goytacazes, Rio de

Janeiro (Latitude: 21° 45' 16" Sul, Longitude: 41° 19' 28" Oeste). O cultivar UENF WS01 [Zea mays L. var. everta (Sturtev.) L. H. Bailey] foi gentilmente fornecido pelo Banco Ativo de Germoplasma (BAG) de milho-pipoca, graças à colaboração e coordenação do projeto “Seleção de Genótipos de Milho de Pipoca Tolerantes a Seca”, liderado por Antônio Teixeira Amaral Júnior (LMGV-CCTA). O UENF WS01 foi registrado no Registro Nacional de Cultivares (RNC) em 12 de fevereiro de 2021 e está categorizado como um híbrido simples resultante do cruzamento ($s = 3$) entre as linhagens L61 e L76 de milho-pipoca.

Durante o experimento, foram realizadas medições contínuas da temperatura e umidade do ar usando *data loggers* (modelo 200 Spectrum Technologies, EUA), bem como a temperatura do solo (modelo RT-1, EUA) e a umidade do solo (modelo MP6, Decagon, EUA). Além disso, a radiação fotossinteticamente ativa foi monitorada (modelo PYR, Spectrum Technologies, EUA).

Com base nos dados de temperatura e umidade relativa do ar, foi possível calcular o déficit de pressão de vapor do ar usando a equação proposta por Jones (1992):

$$DPV_{ar} = 0,61137 * \exp\left(\frac{17,502 * T^{\circ}}{240,97 + T^{\circ}}\right) * \left(1 - \left(\frac{UR\%}{100}\right)\right)$$

Em que:

DPV: déficit de pressão de vapor (kPa) exp: exponencial;

T°: temperatura em graus Celsius; UR: umidade relativa em %.

Avaliação de termografia por infravermelho e de fluorescência

A obtenção da temperatura foliar (TL) foi realizada utilizando a termografia por infravermelho por meio de um termógrafo modelo FLIR i50 (FLI Systems AB, Suíça), com análise dos resultados no software FLIR QuickReport, versão 1.2. As avaliações foram conduzidas no início do experimento e no dia de máximo estresse ($A = zero$), às 8h da manhã. As fotos foram capturadas entre 12:00 e 14:00 horas, a uma média de 30 cm de distância da folha. Durante as avaliações, foram selecionadas duas folhas em uma planta

do tratamento WW (T_{dossel}), sendo que uma folha recebeu uma aplicação pulverizada de água para obter a temperatura foliar mínima ($T_{folha\ com\ água}$), e a outra folha teve vaselina aplicada nas partes abaxial e adaxial, bloqueando assim a transpiração e possibilitando a obtenção da temperatura foliar máxima ($T_{vaselina}$). Ao comparar esses valores de temperatura com uma folha da planta sem nenhuma aplicação, calculamos o índice de estresse (crop water stress index, CWSI) conforme proposto por Jones (1999), por meio da seguinte equação:

$$Indice\ de\ estresse = \frac{(T_{vaselina} - T_{folha\ com\ água})}{(T_{dossel} - T_{folha\ com\ água})}$$

Além disso, foi calculado o índice térmico de condutância estomática relativa (IG) (Jones, 1999), de acordo com a equação:

$$IG = \frac{(T_{vaselina} - T_{dossel})}{(T_{dossel} - T_{folha\ com\ água})}$$

Biomassa das folhas e raízes

Ao término do experimento, realizamos a determinação da massa seca das raízes (MSR), massa seca das folhas (MSF), massa seca do colmo (MSC) e também a determinação da massa seca da parte aérea (MST). A obtenção desses valores permitiu calcular a massa seca total da planta (MST):

$$MST = MSR + MSF + MSC$$

Eficiência fotoquímica

Para avaliar a eficiência fotoquímica, utilizamos o fluorímetro por imagem modelo

FluorCam 800MF (PSI, República Checa), que fornece imagens da emissão da fluorescência de clorofila. Essa tecnologia nos permitiu analisar de forma precisa a eficiência do processo fotoquímico nas plantas estudadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para conduzir o experimento, selecionamos um total de 22 bactérias pertencentes à coleção do LBCT, abrangendo diversos gêneros, tais como *Bacillus*, *Azospirillum*, *Herbaspirillum*, *Paraburkholderia*, *Gluconacetobacter*, *Serratia*, entre outros (Figura 1). Antes de iniciar as inoculações, realizamos a checagem da pureza das bactérias, seguida das etapas de pré-inóculo e inóculo.

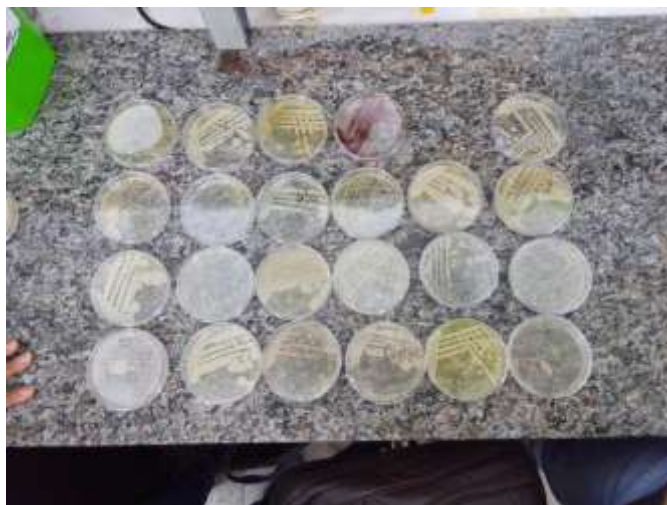


Figura 1: 22 bactérias em placas de petri, vertidas no meio específico para cada gênero e riscadas pelo método de esgotamento.

Após a preparação dos inóculos, procedemos à criação dos substratos para o plantio, utilizando uma mistura de Latossolo amarelo distrófico e areia lavada na proporção de 2:1 (v/v). Essa combinação foi alocada nos tubetes de 280 cm³, como ilustrado na Figura 2.



Figura 2: Montagem do experimento.

O experimento foi conduzido utilizando um delineamento em blocos casualizados. Foram formados 7 blocos, e cada bloco continha 50 unidades experimentais, abrangendo a inoculação de 22 bactérias (D.O. = 1), duas condições de irrigação (WW - totalmente irrigado e WS - sem irrigação) e os controles. Ao todo, o experimento contou com 350 unidades experimentais.

Na Figura 3, à esquerda, é possível observar o início do processo de crescimento, onde as plantas estão desenvolvendo a primeira folha. À direita, podemos ver as plantas em um estágio mais avançado de crescimento, onde já se tornam visíveis diferenças no tamanho e coloração das folhas entre as plantas inoculadas com bactérias e as não inoculadas. Após as plantas atingirem o estágio V1, caracterizado pela completa expansão da primeira folha, realizamos o corte da irrigação no tratamento em que as plantas foram submetidas ao déficit hídrico. As demais plantas continuaram recebendo

irrigação durante todo o ciclo de crescimento. Para induzir o estresse hídrico de forma recorrente, as plantas foram submetidas ao estresse por duas vezes, com períodos de recuperação entre cada estresse.



Figura 3: Primeiros estágios de crescimento e desenvolvimento do milho-pipoca.

Na Tabela 1 estão presentes os resultados obtidos a partir da análise da ANOVA, no qual, foram avaliadas 13 variáveis, 23 genótipos (22 bactérias + Controle) e quatro repetições. As características avaliadas foram:

ALT = altura da planta;

MSPA = massa seca da parte aérea; MSPR = massa seca da parte radicular; MST = massa seca total;

DIAMC = diâmetro do caule; AFT = área foliar total; VOLU = volume total;

DIAMMR = diâmetro médio das raízes; CWSI = índice de estresse;

IG = índice térmico de condutância estomática; IQD = índice de qualidade de Dickson.

Tabela 1 - Resumo da análise de variância; em blocos ao acaso.

Quadrados Médios						
FV	GL	ALT	MSPA	MSPR	MST	MSPR/MST
Blocos	3	3.5099	0.0353	0.0848	0.2041	0.0090
Tratamentos	22	11.2781 **	0.1243 **	0.0592 **	0.3259 **	0.0052 ns
Resíduo	66	3.6744	0.0173	0.0031	0.0208	0.0035
Média		46.73	0.68	0.50	1.18	0.43
CV(%)		4.10	19.31	11.17	12.24	13.82

FV	GL	MSPR/MSPA	DIAMC	AFT	VOLU	DIAMMR
Blocos	3	0.2727	0.5778	907.4962	2.8489	0.0213
Tratamentos	22	0.1458 ns	0.3068 *	663.0212 **	1.6936 **	0.0403 **
Resíduo	66	0.1330	0.1716	281.2577	0.6302	0.0074
Média		0.78	4.91	133.86	5.30	0.71
CV(%)		46.87	8.44	12.53	14.98	12.07

A análise das características ALT, MSPA, MSPR, MST, DIAMC, AFT, VOLU e IQD revelou diferenças significativas entre os blocos de plantas irrigadas e não irrigadas (submetidas a estresse térmico e hídrico) e entre aquelas inoculadas com as bactérias e as não inoculadas. Por outro lado, as características MSPR/MST, MSPR/MSPA, DIAMMR, CWSI e IG não apresentaram diferenças significativas. Com base nas características avaliadas, foram realizadas análises estatísticas para identificar qual bactéria apresentou maior capacidade de atenuar os efeitos inibitórios do estresse térmico e hídrico no processo de crescimento.

A tabela 2 apresenta os resultados de uma seleção baseada na soma de ranks de

diferentes variáveis aqui já mencionadas em um experimento de seleção de progênie. É explicado abaixo cada componente da tabela :

Xo: Menor valor observado para cada variável. Xs: Maior valor observado para cada variável.

Xs: Maior valor observado para cada variável.

h^2 %: Percentual da variância genética (h^2) para cada variável. Indica a proporção da variação total que é devida à variação genética.

GS: Soma de ranks para cada variável. Representa a soma dos ranks atribuídos a cada valor da variável no processo de seleção.

GS %: Percentual da contribuição de cada variável para a Soma de Ranks Total (GANHO TOTAL).

A última linha da tabela, "GANHO TOTAL", representa a soma dos percentuais da contribuição de cada variável para a seleção.

As variáveis que foram selecionadas (Progênie selecionadas) são aquelas que contribuíram mais para o "GANHO TOTAL" da seleção. Elas foram ordenadas por sua contribuição relativa, e o número de progênie selecionadas é dado como 11.

Tabela 2 – índice de seleção baseada na soma de rank. SELEÇÃO BASEADA NA SOMA DE RANK

VARIÁVEL	Xo	Xs	h^2 %	GS	GS %
xALT	46.72609	48.0	67.4199	.85887	1.84
xMSPA	.68176	.8945	86.06	.18308	26.85
xMSP	.49666	.58075	94.80519	.07972	16.05
xMST	1.17842	1.47525	93.61929	.27789	23.58
xMSPR/MST	.42569	.39446	33.1100	-.01034	-2.43
xMSPR/MSPA	.77	.65477	8.7613	-.01081	-1.39
xDIAM	4.90902	4.9	44.07455	-.00398	-.08
xAFT	133.85815	158.835	57.5793	14.38151	10.74
xVOLU	5.30058	6.127	62.7875	.51889	9.79
xDIAM	.71157	.86863	81.6921	.1283	18.03
xCWSI	.88543	.90816	28.1839	.00641	.72
xIG	.16164	.10639	30.4066	-.0168	-10.39
xIQD	.10777	.13036	90.4979	.02044	18.97
GANHO TOTAL				16.4132	

Variável assinalada com o símbolo # apresenta variância genética negativa.

Progênes selecionadas: 11

A seguir, estão as variáveis selecionadas e seus respectivos valores observados:

xALT = 48.
xMSPA = 89
xMSPR = 58
xMST = 1.48
xMSPR/MST = 39
xMSPR/MSPA = 65
xDIAM = 4.9
xAFT = 158.8
xVOLU = 6.13
xDIAM = 87
xCWSI = 91
xIG = 11
xIQD = 13

Essas variáveis foram selecionadas com base em seus respectivos percentuais de contribuição para o "GANHO TOTAL", sendo aquelas com maior contribuição escolhidas para o processo de melhoramento genético ou seleção de progênes.

Na tabela a seguir (Tabela 3) é apresentado o índice baseado em Soma de Ranks de Mulamba e Mock (1978), um método de seleção de indivíduos em um programa de seleção de progênes. Nessa tabela, foram selecionados 1 indivíduo com base nas variáveis apresentadas e seus respectivos pesos econômicos. Cada variável é indicada como "Variável Selecionada", e ao lado está especificado o "Sentido da Seleção" para essa variável, que nesse caso é "Superior". Isso significa que o critério de seleção para cada variável é escolher indivíduos com valores superiores para essas características específicas. Além disso, cada variável tem um "Peso Econômico" associado a ela, que é igual a 1 para todas as variáveis. O peso econômico indica a importância relativa de cada variável no processo de seleção. Nesse caso, todas as variáveis têm o mesmo peso, o que significa que todas têm igual importância para a seleção do indivíduo.

Portanto, com base nesse método de Soma de Ranks de Mulamba e Mock (1978), foi selecionado 1 indivíduo com base nas características apresentadas, buscando

aqueles que possuem valores superiores em todas as variáveis, e todas as variáveis têm o mesmo peso na seleção.

Tabela 3 - Índice baseado em Soma de Ranks - Mulamba e Mock (1978) Número de indivíduos selecionados : 1

Variável Selecionada	Sentido da Seleção	Peso Econômico
xALT	Superior	1
xMSPA	Superior	1
xMSPR	Superior	1
xMST	Superior	1
xMSPR/MST	Superior	1
xMSPR/MSPA	Superior	1
xDIAM	Superior	1
xAFT	Superior	1
xVOLU	Superior	1
xDIAM	Superior	1
xCWSI	Superior	1
xIG	Superior	1
xIQD	Superior	1

Variáveis analisadas através da fluorescência de clorofila

Quanto a avaliação da fluorescência de clorofila analisada através do *Fluor cam* foram possíveis de serem analisadas as seguintes variáveis que apresentaram diferença significativa entre os tratamentos realizados.

Variáveis	WW	WS
F0	94,32	120,1
QYMÁX	0,72	0,59
QYLSS	0,12	0,11
NPQLSS	1,72	1,71
NPQD	0,11	0,18

Tabela 4 com a média das variáveis para o tratamento com a condição totalmente irrigada – WW e sem irrigação apropriada – WS.

A seguir são apresentados gráficos com base na análise estatística de *scott e knott* em cada uma das variáveis nos diferentes tratamentos realizados tanto para condição de irrigação quanto para condição sem irrigação. Nos gráficos que seguem T1 representa o tratamento controle enquanto os demais representam o tratamento com as diferentes bactérias utilizadas.

Para a variável fluorescência inicial (F0) foi observado certa estabilidade quanto aos valores entre os diferentes tratamentos, como pode ser observado no Gráfico 1, podendo indicar que os efeitos benéficos não possuem diferença significativa entre as diferentes bactérias utilizadas quando analisada à uma condição bem irrigada. Já quanto aos valores desta variável nas condições de stress hídrico houve grande variação entre as diferentes bactérias utilizadas além da diferença entre as mesmas e o tratamento controle que demonstrou ser consideravelmente inferior, podendo sugerir que a escassez de água está afetando significativamente a resposta das plantas além de sugerir que algumas associações sejam mais resilientes apresentando maior adaptabilidade e sobrevivência em condições de escassez de água.

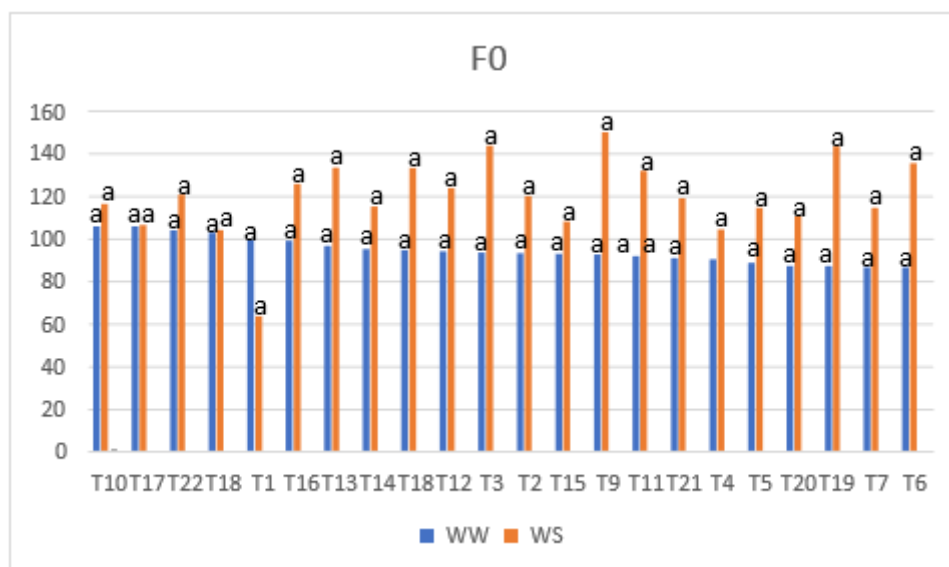


Gráfico 1: valores de fluorescência inicial para o tratamento controle T1 e os demais tratamentos inoculados com as rizobactérias analisadas com método estatístico de scott e knott a nível de significância de p<0,05

A variável F0 representa a fluorescência inicial que se refere à intensidade de fluorescência emitida por uma amostra vegetal no momento inicial da medição, antes de qualquer estímulo luminoso ser aplicado. Em outras palavras, é a fluorescência medida no escuro, quando a amostra não está sendo exposta a nenhuma luz ativa ou fotossintética. A fluorescência inicial é registrada para estabelecer uma linha de base ou referência antes de expor a amostra à luz ativa. Essa medição é importante para entender o estado fotossintético da planta em condições de escuro total e pode ser usada para normalizar os valores de fluorescência obtidos durante a análise sob diferentes condições de luz. (P.I. Calzadilla et al., 2022; Elisa Gorbe e Angeles Calatayud, 2012)

O gráfico 2 apresenta os valores de QYLSS onde há grande variação nos valores de rendimento quântico efetivo no estado estacionário da fotossíntese adaptada à luz entre diferentes tratamentos com deficiência na irrigação, sugerindo que a escassez de água está desempenhando um papel significativo na resposta das plantas à luz. Essa variação pode indicar diferentes níveis de resiliência das plantas à deficiência hídrica, refletindo a capacidade de cada associação com determinada rizobactéria em se adaptar e utilizar eficientemente a luz para a fotossíntese sob condições de estresse hídrico. Enquanto a constância desses valores entre tratamentos com boa irrigação sugere estabilidade e eficiência da fotossíntese nessas condições. É possível observar também os tratamentos com os maiores valores para QYLSS na condição WS sendo o tratamento T15, além de superarem essa variável nessas mesmas condições até mesmo o tratamento controle, mostrando maior eficiência fotoquímica utilizando o processo de inoculação.

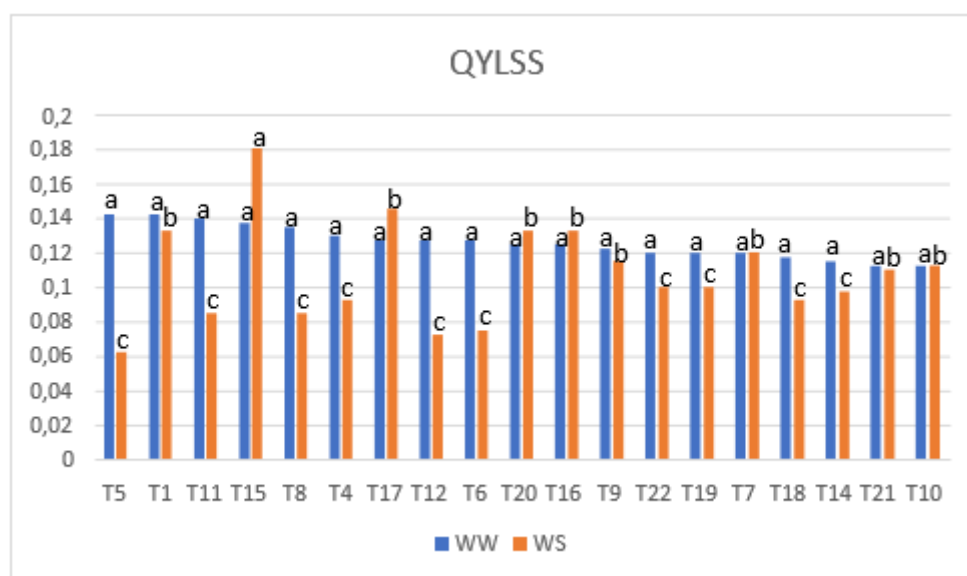


Gráfico 2: valores de rendimento quântico efetivo no estado estacionário da fotossíntese adaptada à luz para o tratamento controle T1 e os demais tratamentos inoculados com as rizobactérias analisadas com método estatístico de scott e knott a nível de significância de $p < 0,05$

A variável QYSS representa o rendimento quântico efetivo no estado estacionário da fotossíntese adaptada à luz que é uma medida da eficiência do fotossistema II (PSII) em capturar e utilizar a luz na fotossíntese quando a planta está adaptada à luz. O estado estacionário da fotossíntese adaptada à luz refere-se ao momento em que a planta já se ajustou às condições de iluminação e atingiu um equilíbrio entre a absorção de luz e a produção de energia, ele avalia como o PSII está utilizando a luz disponível para a fotossíntese, é importante para avaliar a eficiência da fotossíntese em condições de iluminação constante, fornecendo informações sobre a saúde e a resposta fotossintética da planta sob diferentes condições de luz. (Zhuang Chen et al., 2022).

O gráfico 3 demonstra que o rendimento quântico máximo do PSII em estado adaptado ao escuro é sempre maior para os tratamentos com uma boa condição de irrigação do que para os tratamentos com déficit na irrigação podendo indicar que o aumento no rendimento quântico máximo do PSII em plantas bem irrigadas pode ser uma resposta adaptativa que visa maximizar a captação de luz e, conseqüentemente, a

produção de energia para enfrentar condições ótimas de crescimento. Essa adaptação pode aumentar as chances de sobrevivência e reprodução das plantas sob boas condições hídricas. Outro indicativo é o impacto negativo do déficit hídrico na fotossíntese. A falta de água pode levar a estresses fisiológicos nas plantas, prejudicando a funcionalidade do PSII e reduzindo a capacidade de absorver e utilizar a luz para a fotossíntese. A diferença nos valores do rendimento quântico máximo do PSII entre tratamentos pode ser um indicativo da resiliência das bactérias utilizadas às condições de estresse hídrico. Plantas associadas com rizobactérias com maior rendimento quântico máximo do PSII podem ser mais resistentes e adaptadas à falta de água, enquanto as plantas com menor rendimento podem ser mais sensíveis e vulneráveis à escassez hídrica. Os tratamentos com condição hídrica favorável não demonstraram diferença significativa para os valores de QYMAX, enquanto os tratamentos para a condição de estresse hídrico onde os tratamentos com maiores médias foram T17, T7, T2, T9, T16, T15, T22, T11, T21, T10, T4, T1, T8 apresentaram diferença significativa se diferenciando dos tratamentos T13, T12, T18, T20, T6, T5 e T19 com os menores valores.

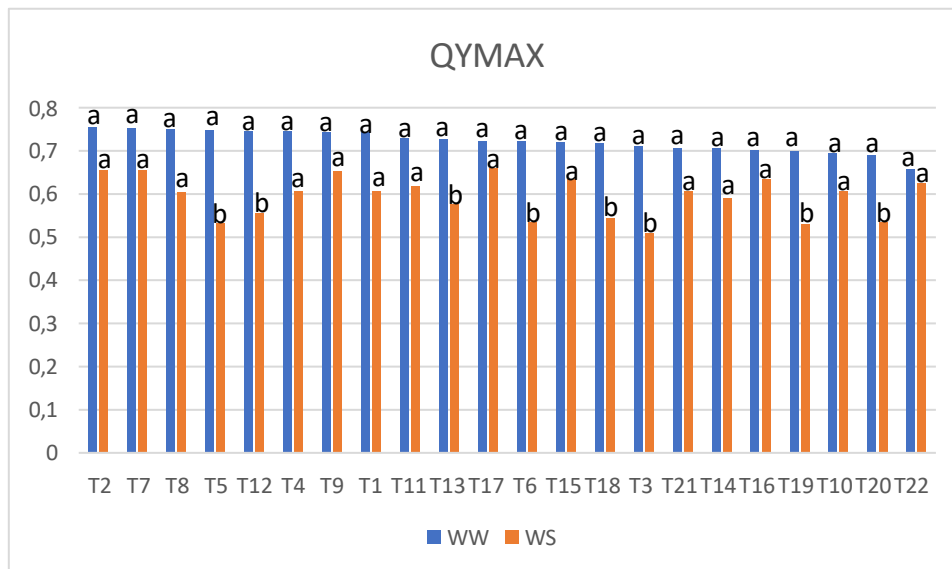


Gráfico 3: valores de rendimento quântico máximo do PSII em estado adaptado ao escuro para o tratamento controle T1 e os demais tratamentos inoculados com as rizobactérias analisadas com método estatístico

de scott e knott a nível de significância de $p < 0,05$

A variável QYMAX refere-se ao rendimento quântico máximo do PSII em estado adaptado ao escuro que é uma medida importante da eficiência do PSII em capturar e utilizar a energia luminosa na fotossíntese. Esse parâmetro é usado para avaliar o estado fotossintético de uma planta e sua capacidade de utilizar a luz para produzir energia (Zhuang Chen et al., 2022).

No gráfico 4 é possível observar uma maior diferença entre os valores do quenching não-fotoquímico no estado estacionário da fotossíntese adaptada à luz entre as diferentes condições hídricas nos tratamentos com associação com rizobactérias do que no tratamento controle podendo indicar que a associação com rizobactérias pode estar aumentando a resistência das plantas ao estresse hídrico, permitindo que elas mantenham um quenching não-fotoquímico mais eficiente sob condições de falta de água. Os tratamentos inoculados apresentaram maiores valores quando se trata dessa variável, quando comparada com o controle T1. Na condição WW os tratamentos com as maiores médias foram: T3, T14, T4, T15, T6, T5, T16, T17 e T18, respectivamente. E na condição WS foram os tratamentos T2, T8, T14, T4, T11, T6, T5, T9, T16, T12, T19, T10, T17 e T22, respectivamente.

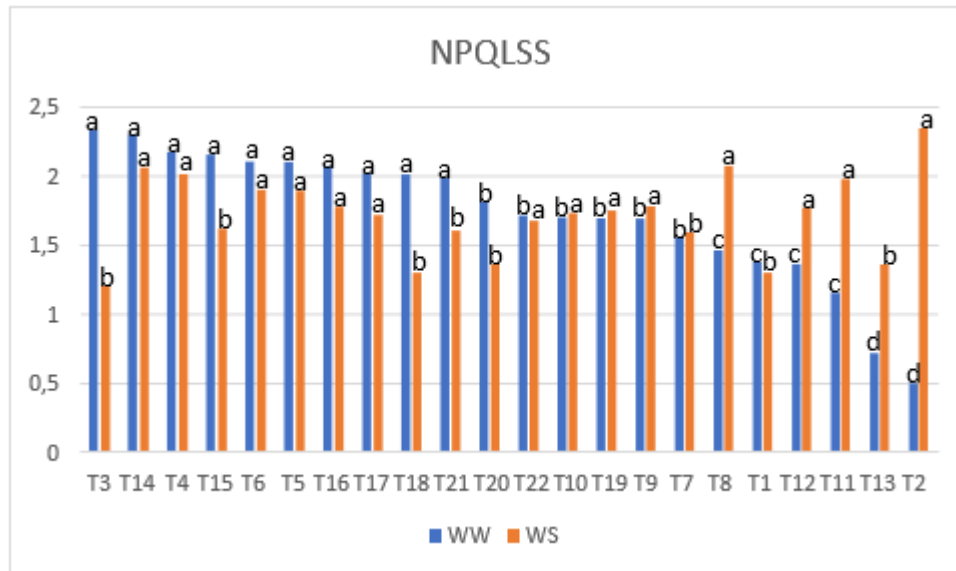


Gráfico 4: valores de quenching não-fotoquímico no estado estacionário da fotossíntese adaptada à luz para o tratamento controle T1 e os demais tratamentos inoculados com as rizobactérias analisadas com método estatístico de scott e knott a nível de significância de $p < 0,05$

A variável NPQLSS diz respeito ao quenching não-fotoquímico no estado estacionário da fotossíntese adaptada à luz, que refere-se a um mecanismo de dissipação de energia que ocorre nos fotossistemas fotossintéticos, especialmente no fotossistema II (PSII) das plantas, quando estão expostas à luz intensa por um período prolongado, um mecanismo de proteção onde a energia luminosa absorvida pelo PSII é desviada para vias não-fotoquímicas, onde é convertida em calor e dissipada para o ambiente circundante. Ele contribui para o equilíbrio energético da planta sob diferentes condições de iluminação (Patricia Müller et al., 2001).

O gráfico 5 apresenta o quenching não-fotoquímico instantâneo durante o período de relaxamento da fluorescência no escuro apresentou menores médias na condição WW quando comparado com a condição WS. Na condição WW o tratamento T3 se destacou quando comparado com os demais tratamentos, além disso, diversos tratamentos também apresentaram diferença significativa quando comparado com o tratamento controle, sendo eles, T14, T4, T16, T6, T15, T5, T17, T10 e T19,

respectivamente. Já na condição WS não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos.

Algumas bactérias podem ter favorecido para uma melhor absorção de luz pelas plantas. Isso pode levar a um aumento na utilização da energia luminosa para a fotossíntese e, conseqüentemente, a uma menor dissipação não-fotoquímica de energia. Outra possibilidade é a de que sob condições de boa irrigação, as plantas podem estar menos sujeitas a estresses fisiológicos, como o estresse oxidativo, que é comum em condições de escassez de água. O estresse oxidativo pode aumentar a dissipação não-fotoquímica como uma forma de proteção contra danos causados pelo acúmulo de energia não utilizada, mas sob boa irrigação, esse mecanismo pode ser menos necessário. Concomitantemente a associação com rizobactérias pode estar contribuindo para melhorar a eficiência fotossintética das plantas em ambos os tratamentos, mas essa melhora pode ser mais evidente na condição WW. As rizobactérias podem estar atuando de maneira sinérgica com a irrigação adequada para promover uma resposta fotossintética mais eficiente.

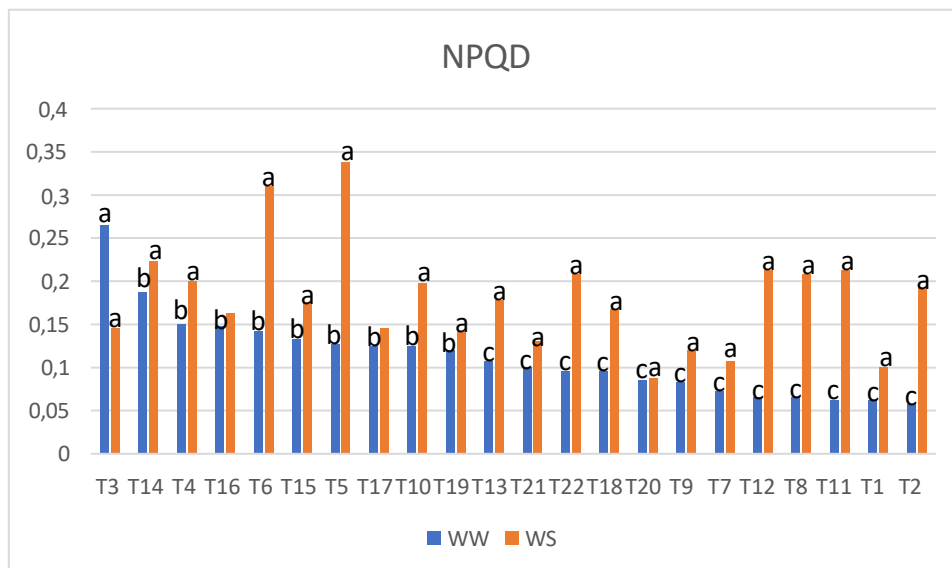


Gráfico 5: valores de quenching não-fotoquímico instantâneo durante o período de relaxamento da fluorescência no escuro para o tratamento controle T1 e os demais tratamentos inoculados com as

rizobactérias analisadas com método estatístico de scott e knott a nível de significância de $p < 0,05$

O NPQD representa o quenching não-fotoquímico instantâneo durante o período de relaxamento da fluorescência no escuro, que é um fenômeno que ocorre quando uma planta ou organismo fotossintético está em escuridão total após ter sido exposto a uma intensa luz fotossinteticamente ativa, obtendo uma energia que não pode ser gasta fotossinteticamente e pode ser prejudicial ao aparato fotossintético se não utilizada fazendo com que seja dispersa na forma de calor, e ocorre apenas durante o período de relaxamento da fluorescência quando a planta é transferida da luz para a escuridão (Patricia Müller et al., 2001).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente experimento teve como objetivo investigar o efeito da associação com diferentes rizobactérias na resposta fotossintética de plantas submetidas a diferentes condições hídricas. Os resultados obtidos revelaram diferenças significativas nas respostas das plantas entre os tratamentos com e sem irrigação, bem como entre as diferentes associações com as rizobactérias. Os dados da fluorescência inicial (F0) mostraram que, em condições de boa irrigação (tratamento WW), houve uma certa constância nos valores dessa variável entre os diferentes tratamentos com as associações de rizobactérias, indicando que os efeitos benéficos dessas associações não apresentaram diferença significativa nessa condição. No entanto, nas condições de estresse hídrico (tratamento WS), observou-se uma grande variação nos valores da fluorescência inicial entre os tratamentos, sugerindo que a escassez de água está afetando significativamente a resposta das plantas. Algumas associações mostraram-se mais resilientes, apresentando maior adaptabilidade e sobrevivência em condições de estresse hídrico, o que pode ser uma indicação promissora para futuros programas de melhoramento genético visando a obtenção de plantas mais resistentes à escassez de água. A análise do rendimento quântico efetivo no estado estacionário da fotossíntese

adaptada à luz (QYLSS) também revelou diferenças significativas entre os tratamentos com boa irrigação e os tratamentos com déficit hídrico. Enquanto a constância dos valores de QYLSS nas plantas bem irrigadas sugere estabilidade e eficiência da fotossíntese nessas condições, a grande variação nos valores de QYLSS nas plantas com déficit hídrico indica diferentes níveis de resiliência das plantas à escassez de água. As associações com rizobactérias podem estar desempenhando um papel benéfico na capacidade de utilização eficiente da luz para a fotossíntese sob condições de estresse hídrico. Outro resultado importante foi observado no rendimento quântico máximo do PSII em estado adaptado ao escuro (QYMAX), onde os tratamentos com boa irrigação apresentaram valores sempre maiores do que os tratamentos com déficit hídrico. Isso sugere que o aumento no QYMAX em plantas bem irrigadas pode ser uma resposta adaptativa que visa maximizar a captação de luz e, conseqüentemente, a produção de energia para enfrentar condições ótimas de crescimento. Por outro lado, o déficit hídrico pode levar a estresses fisiológicos nas plantas, prejudicando a funcionalidade do PSII e reduzindo a capacidade de absorver e utilizar a luz para a fotossíntese. A análise do quenching não-fotoquímico no estado estacionário da fotossíntese adaptada à luz (NPQLSS) e do quenching não-fotoquímico instantâneo durante o período de relaxamento da fluorescência no escuro (NPQD) também indicou diferenças significativas entre os tratamentos com diferentes associações de rizobactérias e condições hídricas. A associação com rizobactérias parece ter um impacto positivo na resposta das plantas ao estresse hídrico, permitindo que elas mantenham um quenching não-fotoquímico mais eficiente sob condições de falta de água. Em suma, os resultados deste experimento fornecem insights valiosos sobre o papel das rizobactérias na resposta fotossintética das plantas sob diferentes condições hídricas. As associações com rizobactérias podem influenciar significativamente a eficiência fotossintética das plantas, tornando-as mais resilientes e adaptadas a condições adversas, como o estresse hídrico. Esses achados têm implicações importantes para a agricultura e o melhoramento genético de culturas, pois podem auxiliar no desenvolvimento de estratégias de manejo que visem melhorar a eficiência fotossintética e a resistência das plantas à escassez de água. No entanto, é importante destacar que esse estudo abordou

apenas um conjunto específico de rizobactérias e condições hídricas, e que diferentes associações e níveis de estresse podem produzir resultados distintos. Portanto, futuras pesquisas são necessárias para aprofundar nosso entendimento sobre os mecanismos envolvidos nas interações entre rizobactérias e plantas em condições de estresse hídrico, bem como para avaliar a eficácia dessas associações em diferentes ambientes e culturas. Por fim, os resultados aqui apresentados contribuem para o avanço do conhecimento científico na área da fisiologia vegetal e da microbiologia agrícola, oferecendo informações valiosas para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis de manejo agrícola que promovam a adaptação das plantas a condições de estresse ambiental, como a escassez de água. Esperamos que esses achados possam ser aplicados no futuro para aprimorar as práticas agrícolas e contribuir para a segurança alimentar em um cenário global de mudanças climáticas e recursos naturais limitados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Águas (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: relatório pleno / Agência Nacional de Águas. -- Brasília: ANA, 2017. CAMPOS DOS GOYTACAZES, P. M. Perfil Campos dos Goytacazes 2018. Campos dos Goytacazes – RJ: [s.n.].

Noreen Zahra, Muhammad Bilal Hafeez, Abdul Ghaffar, Abida Kausar, Maryam Al Zeidi, Kadambot H.M. Siddique, Muhammad Farooq. (2023). Plant photosynthesis under heat stress: Effects and management. *Environmental and Experimental Botany*. Volume 206.

Guidi, L., Mori, S., Degl'Innocenti, E., Pecchia, S. (2007). Effects of ozone exposure or fungal pathogen on white lupin leaves as determined by imaging of chlorophyll a fluorescence. *Plant Physiology and Biochemistry*, 45(10): 851–857.

Guidi, L., Degl'Innocenti, E. (2011). Imaging of chlorophyll a fluorescence: a tool to study abiotic stress in plants. In: Shanker, A. and Venkateswarlu, B. *Abiotic stress in plants - mechanisms and adaptations*. IntechOpen. Disponível em: Acesso em 20 dez. 2020.

JONES, H. G. *Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology*. C

Murchie, E. H., Lawson, T. (2013). Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications. *Journal of Experimental Botany*, 64(13): 3983–3998.

Ehlert, B., Hinch, D. K. (2008). Chlorophyll fluorescence imaging accurately quantifies freezing damage and cold acclimation responses in Arabidopsis leaves. *Plant Methods*, 4(1): 12.

Agência Nacional de Águas (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: relatório pleno / Agência Nacional de Águas. -- Brasília: ANA, 2017.

Fahad, S., Bajwa, A. A., Nazir, U., Anjum, S. A., Farooq, A., Zohaib, A., Sadia, S., Nasim, W., Adkins, S., Saud, S., Ihsan, M. Z., Alharby, H., Wu, C., Wang, D., Huang, J. (2017). Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. *Frontiers in Plant Science*, 8, p. 1147.

CAMPOS DOS GOYTACAZES, P. M. Perfil Campos dos Goytacazes 2018. Campos dos Goytacazes – RJ: [s.n.].

JONES, H. G. Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology. Cambridge University Press, 1992. ISBN 0521425247.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Registro nacional de cultivares, 2019.

Crafts-Brandner, S. J., Salvucci, M. E. (2004). Analyzing the impact of high temperature and CO₂ on net photosynthesis: biochemical mechanisms, models and genomics. *Field Crops Research*, 90(1): 75–85.

Kadam, N. N., Xiao, G., Melgar, R. J., Bahuguna, R. N., Quinones, C., Tamilselvan, A., Prasad, P. V. V., Jagadish, K. S. V. (2014). Chapter Three - Agronomic and physiological

responses to high temperature, drought, and elevated CO₂ interactions in cereals. In: Sparks, D. (ed.), 127, pp. 111–156. Academic Press.

XAVIER, K. B.; KAMPHORST, S. H.; CARVALHO, C. M.; SILVA, R. M. R.; SILVA- JÚNIOR, S. B.; LIMA, V. J.; AMARAL-JÚNIOR, A. T.

Rühle, T., Reiter, B., Leister, D. (2018). Chlorophyll fluorescence video imaging: a versatile tool for identifying factors related to photosynthesis. *Frontiers in Plant Science*, 9: 55.

Sánchez-Moreiras, A. M., Graña, E., Reigosa, M. J., Araniti, F. (2020). imaging of chlorophyll a fluorescence in natural compound-induced stress detection. *Frontiers in Plant Science*, 11: 1991.

Gorbe, E., Calatayud, A. (2012). Applications of chlorophyll fluorescence Imaging technique in horticultural research: A review. *Scientia Horticulturae*, 138: 24–35.

Barbagallo, R. P., Oxborough, K., Pallett, K. E., Baker, N. R. (2003). Rapid, noninvasive screening for perturbations of metabolism and plant growth using chlorophyll fluorescence imaging. *Plant Physiology*, 132(2): 485 – 493.

Oxborough, K. (2004). Imaging of chlorophyll a fluorescence: theoretical and practical aspects of an emerging technique for the monitoring of photosynthetic performance. *Journal of Experimental Botany*, 55(400): 1195–1205.

Comércio de Milho-Pipoca na Região Norte Fluminense e Características Apreciadas no Produto. Revista de Extensão UENF, v. 4, n. 2.

Lesk, C., Rowhani, P., Ramankutty, N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529(7584): 84–87.

Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S. S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., Xu, J. (2019). Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: A review. *Plants*, 8(2): 34.

Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Alam, M. M., Roychowdhury, R., Fujita, M. (2013). Physiological, biochemical, and molecular mechanisms of heat stress tolerance in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 14(5): 9643-9684.

Yang, X., Chen, X., Ge, Q., Li, B., Tong, Y., Zhang, A., Li, Z., Kuang, T., Lu, C. (2006). Tolerance of photosynthesis to photoinhibition, high temperature and drought stress in flag leaves of wheat: A comparison between a hybridization line and its parents grown under field conditions. *Plant Science*, 171(3): 389–397.

2019.ambridge University Press, 1992. ISBN 0521425247. BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Registro nacional de cultivares, 2019.

Goltsev, V. N., Kalaji, H. M., Paunov, M., Bąba, W., Horaczek, T., Mojski, J., Kociel, H., Allakhverdiev, S. I. (2016). Variable chlorophyll fluorescence and its use for assessing physiological condition of plant photosynthetic apparatus. *Russian Journal of Plant Physiology*, 63(6): 869–893.

Kalaji, H. M., Schansker, G., Brestic, M., Bussotti, F., Calatayud, A., Ferroni, L., Goltsev, V., Guidi, L., Jajoo, A., Li, P., Losciale, P., Mishra, V. K., Misra, A. N., Nebauer, S. G., Pancaldi, S., Penella, C., Pollastrini, M., Suresh, K., Tambussi, E., Yannicari, M., Zivcak, M., Cetner, M. D., Samborska, I. Z., Stirbet, A., Olsovska, K., Kunderlikova, K., Shelonzek, H., Rusinowski, S., Bąba, W. (2017). Frequently asked questions about chlorophyll fluorescence, the sequel. *Photosynthesis Research*, 132(1): 13–66.

Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., Foolad, M. R. (2007). Heat tolerance in plants: An overview. *Environmental and Experimental Botany*, 61(3): 199–223.

XAVIER, K. B.; KAMPHORST, S. H.; CARVALHO, C. M.; SILVA, R. M. R.; SILVA-JÚNIOR, S. B.; LIMA, V. J.; AMARAL-JÚNIOR, A. T. Comércio de Milho-Pipoca na Região Norte

Fluminense e Características Apreciadas no Produto. Revista de Extensão UENF, v. 4, n. 2, 2019.

Ashraf, M., Hafeez, M. (2004). Thermotolerance of pearl millet and maize at early growth stages: growth and nutrient relations. *Biologia Plantarum*, 48(1): 81–86.

Vani, B., Pardha Saradhi, P., Mohanty, P. (2001). Alteration in chloroplast structure and thylakoid membrane composition due to in vivo heat treatment of rice seedlings: correlation with the functional changes. *Journal of Plant Physiology*, 158(5): 583–592.

Portis, A. R. (2003). RuBisCO activase – RuBisCO's catalytic chaperone. *Photosynthesis Research*, 75(1): 11–27.

Rodríguez, M., Canales, E., Borrás-Hidalgo, O. (2005). Molecular aspects of abiotic stress in plants. *Biotecnología Aplicada*, 22(1): 1–10.

Cavatte, P. C., Martins, S. C. V, Morais, L. E., Silva, P. E. M., DaMatta, F. M. (2012). The physiology of abiotic stresses. In: Fritsche-Neto, R., Borém, A. (eds.) *Plant Breeding for Abiotic Stress Tolerance*. Berlin: Springer, pp. 21–51.

Asada, K. (2006). Production and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts and their functions. *Plant Physiology*, 141(2): 391 – 396.

Reddy, A. R., Chaitanya, K. V., Vivekanandan, M. (2004). Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. *Journal of Plant Physiology*, 161(11): 1189–1202.

Dogra, V., Kim, C. (2019). Chloroplast protein homeostasis is coupled with retrograde signaling. *Plant Signaling Behavior*, 14(11): 1656037.

Lobell, D. B., Schlenker, W., Costa-Roberts, J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042): 616 – 620.

Perdomo, J. A., Capó-Bauçà, S., Carmo-Silva, E., Galmés, J. (2017). RuBisCO and RuBisCO activase play an important role in the biochemical limitations of photosynthesis in rice, wheat, and maize under high temperature and water deficit. *Frontiers in Plant Science*, 8: 490.

Żróbek-Sokolnik, A. (2012). Temperature stress and responses of plants. In: Ahmad, P., Prasad, M. (eds.) *Environmental adaptations and stress tolerance of plants in the era of climate change*. New York: Springer, p. 113–134.

Salvucci, M. E., Crafts-Brandner, S. J. (2004). Inhibition of photosynthesis by heat stress: the activation state of RuBisCO as a limiting factor in photosynthesis. *Physiologia Plantarum*, 120(2): 179–186.

Hu, S., Ding, Y., Zhu, C. (2020). Sensitivity and responses of chloroplasts to heat stress in plants. *Frontiers in Plant Science* 11: 375.

Hermida-Carrera, C., Kapralov, M. V, Galmés, J. (2016). RuBisCO catalytic properties and temperature response in crops. *Plant Physiology*, 171(4): 2549 – 2561.

Baker, N. R. (2008). Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. *Annual Review of Plant Biology*, 59(1): 89–113.

Mullineaux, C. W., Kirchhoff, H. (2009). Role of Lipids in the Dynamics of Thylakoid Membranes. In: Wada H., Murata N. (eds) *Lipids in photosynthesis. Advances in photosynthesis and respiration*. Dordrecht: Springer, 30, pp 283–294.

P.I. Calzadilla, F.E.L. Carvalho, R. Gomez, M.C. Lima Neto, S. (2022) Signorelli, Assessing photosynthesis in plant systems: A cornerstone to aid in the selection of resistant and productive crops. *Environmental and Experimental Botany*. Volume 20

Elisa Gorbe, Angeles Calatayud. (2012) Applications of chlorophyll fluorescence imaging technique in horticultural research: A review. *Scientia Horticulturae*. Volume 138.

Patricia Müller et al. (2001) Non-Photochemical Quenching. A Response to Excess Light Energy, *Plant Physiology*. Volume 125. Pages 1558–1566.

Zhuang Chen, Zhigang Liu, Shuai Han, Hao Jiang, Shan Xu, Huarong Zhao, Sanxue Ren. (2022) Using the diurnal variation characteristics of effective quantum yield of PSII photochemistry for drought stress detection in maize. *Ecological Indicators*. Volume 138.