

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE MARECHAL CÂNDIDO RONDON

MICHELE ALINE ANKLAN

MITIGAÇÃO DE ESTRESSE POR ENCHARCAMENTO EM SOJA PROMOVIDA
POR *Azospirillum brasilense* E EXTRATO DE ALGAS

MARECHAL CÂNDIDO RONDON-PARANÁ

2025

MICHELE ALINE ANKLAN

MITIGAÇÃO DE ESTRESSE POR ENCHARCAMENTO EM SOJA PROMOVIDA
POR *Azospirillum brasilense* E EXTRATO DE ALGAS

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Prof. Dr. Vandeir Francisco Guimarães

Coorientador: Prof. Dr. José Barbosa Duarte Júnior

MARECHAL CÂNDIDO RONDON- PARANÁ
2025

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Anklan, Michele Aline
MITIGAÇÃO DE ESTRESSE POR ENCHARCAMENTO EM SOJA PROMOVIDA
POR *Azospirillum* brasilense E EXTRATO DE ALGAS / Michele
Aline Anklan; orientador Vandeir Francisco Guimarães;
coorientador José Barbosa Duarte Júnior. -- Marechal Cândido
Rondon, 2025.
81 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Marechal
Cândido Rondon) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná,
Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em
Agronomia, 2025.

1. *Glycine max* L. . 2. *Ascophyllum nodosum*. 3. Hipóxia. I.
Guimarães, Vandeir Francisco , orient. II. Duarte Júnior,
José Barbosa , coorient. III. Título.



Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Campus de Marechal Cândido Rondon - CNPJ 78680337/0003-46
Rua Pernambuco, 1777 - Centro - Cx. P. 91 - <http://www.unioeste.br>
Fone: (45) 3284-7878 - Fax: (45) 3284-7879 - CEP 85960-000
Marechal Cândido Rondon - PR.



MICHELE ALINE ANKLAN

Mitigação de estresse por encharcamento em soja promovida por *Azospirillum brasilense*
e extrato de algas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia em
cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestra em Agronomia,
área de concentração Produção Vegetal, linha de pesquisa Manejo de Culturas,
APROVADA pela seguinte banca examinadora:


Orientador - Vandeir Francisco Guimarães

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon (UNIOESTE)


Paulo Sérgio Rabello de Oliveira

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon (UNIOESTE)


Roberto Cecatto Junior

CZ Industria de Fertilizantes Ltda (Clear Agro)

Marechal Cândido Rondon, 22 de agosto de 2025

*A meus pais, Hilário S. Anklan e Elseni
C.L. Anklan e ao meu amor Mateus Klein, pois
sempre estiveram ao meu lado me incentivando,
e não mediram esforços para me auxiliar a
chegar até aqui, além do carinho e apoio para
vencer mais essa etapa.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter permitido que eu tivesse saúde e determinação para não desanimar durante a realização deste trabalho e fez com que meus objetivos fossem alcançados.

Agradeço, com todo o meu carinho, aos meus pais, Hilario Stallbaum Anklan e Elseni Clarice Ladwig Anklan, que sempre estiveram ao meu lado, apoiando-me em toda a minha trajetória e garantindo que jamais me faltasse nada nesta vida.

Ao meu querido namorado, Mateus Klein, cujo amor e apoio foram inestimáveis durante este processo. Sua paciência e compreensão foram uma constante fonte de encorajamento quando os desafios pareciam insuperáveis. Obrigada por estar ao meu lado em cada passo desta jornada.

Ao meu irmão Thiago Vanderlei Anklan, minha cunhada Rejane Boldo Anklan, minha afilhada Yasmin Gabrieli Boldo Anklan e sobrinha Isabela Vitória Boldo Anklan pela amizade e atenção dedicadas quando sempre precisei.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná por ofertar o Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Aos professores pelos conhecimentos transmitidos, pela ajuda e pela paciência com a qual guiaram o meu aprendizado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Vandeir Francisco Guimarães, por apresentar a iniciação científica, pelo incentivo, amizade e pela dedicação em me orientar durante toda a jornada acadêmica.

Aos integrantes e amigos do Grupo de Estudos Fisiologia de Plantas Cultivadas no Oeste do Paraná, em especial a Tauane Santos Brito, Roberto Cecatto Junior, André Silas Lima Silva e Guilherme Boes Sackser. À CAPES e a FUNDECAMP pela bolsa de estudos e materiais para a realização do experimento.

Aos funcionários do Núcleo de Estações experimentais NEE- Unioeste.

À Caltech, pela concessão do produto Acadian®, contribuição fundamental para o desenvolvimento deste trabalho. Registro, também, minha gratidão ao Sr. Samir pela atenção e gentileza no atendimento.

RESUMO

ANKLAN, Michele Aline. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, agosto de 2025.

Mitigação de estresse por encharcamento em plantas de soja promovida por *Azospirillum brasilense* e extrato de algas. Orientador: Prof. Dr. Vandeir Francisco Guimarães. Coorientador: Prof. Dr. José Barbosa Duarte Júnior.

A cultura da soja é de grande importância na agricultura brasileira, mas seu desenvolvimento pode ser comprometido por condições de encharcamento do solo. Como alternativa para mitigar esses efeitos, destacam-se o uso de bioestimulantes, como o extrato de algas marinhas de *Ascophyllum nodosum*, e a inoculação de bactérias promotoras de crescimento vegetal, como a *Azospirillum brasilense*. Objetivou-se com este estudo avaliar o desenvolvimento da cultura da soja sob solo encharcado com a inoculação de *A. brasilense* ou aplicação foliar do extrato de *A. nodosum*, estudar seus benefícios nas variáveis fotossintéticas, anatômicas, biométricas e produtivas. O ensaio foi conduzido em delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições, em triplicata, e os tratamentos foram: T1 - plantas conduzidas em solo próximo da capacidade de campo (controle); T2 - plantas inoculadas via semente com *A. brasilense* e em solo próximo da capacidade de campo; T3 - plantas submetidas à pulverização foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) e em solo próximo da capacidade de campo; e T4 - plantas inoculadas via semente com *A. brasilense* + pulverização foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) e em solo próximo da capacidade de campo; T5 - plantas expostas ao solo encharcado (controle encharcado); T6 - plantas inoculadas via semente com *A. brasilense* e expostas ao solo encharcado; T7 - plantas submetidas a pulverização foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) e expostas ao solo encharcado; e T8 - plantas inoculadas via semente com *A. brasilense* + pulverização foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) e expostas ao solo encharcado no início do desenvolvimento das vagens (R3). A parcela experimental consistiu em vasos de 12 litros com duas plantas por repetição. A aplicação foliar do extrato de algas ocorreu nos estádios fenológicos V5 e R1. Aos 10 e 20 dias após a imposição do encharcamento foram coletadas amostras para as avaliações anatômicas, biométricas e fisiológicas de trocas gasosas. Ao final do ciclo foram realizadas as avaliações produtivas. O encharcamento do solo prejudicou a atividade fotossintética, pigmentos fotossintéticos, índice SPAD e os teores foliares de nitrogênio e fósforo. Embora os bioinsumos não tenham atuado diretamente na manutenção desses

fatores, contribuíram positivamente para outras variáveis, reduzindo os impactos do estresse na produção. A aplicação foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) foi mais eficiente na preservação das características biométricas e produtivas, minimizando perdas. Por outro lado, a inoculação com *A. brasilense* apresentou respostas menos expressivas na mitigação dos efeitos negativos. A análise anatômica revelou aclimação das raízes ao encharcamento. A inoculação com *A. brasilense* aumentou o diâmetro das raízes e o número de metaxilemas, sugerindo estímulo ao desenvolvimento radicular. A aplicação foliar de extrato de algas, isoladamente ou combinada com *A. brasilense*, promoveu o incremento do diâmetro do cilindro central e do número de metaxilemas, indicando uma melhoria na condução de água e nutrientes.

Palavras-chave: *Glycine max* L. *Ascophyllum nodosum*. Hipóxia.

ABSTRACT

ANKLAN, Michele Aline. Western Paraná State University, Aug 2025. **Mitigation of waterlogging stress in soybean plants promoted by *Azospirillum brasilense* and algae extract**. Advisor: Prof. Dr. Vandeir Francisco Guimarães. Co-advisor: Prof. Dr. José Barbosa Duarte Júnior.

Soybean is a crucial crop in Brazilian agriculture, but its development can be compromised by waterlogged soil. Alternatives to mitigate these effects include the use of biostimulants, such as *Ascophyllum nodosum* seaweed extract, and the inoculation of plant growth-promoting bacteria, such as *Azospirillum brasilense*. The objective of this study was to evaluate the development of soybean crops in waterlogged soil inoculated with *A. brasilense* or foliar application of *A. nodosum* extract, and to study their benefits on photosynthetic, anatomical, biometric, and productive variables. The trial was conducted in a randomized complete block design with four replicates in triplicate. The treatments were: T1 - plants grown in soil near field capacity (control); T2 - plants inoculated via seed with *A. brasilense* and in soil near field capacity; T3 - plants subjected to foliar spray of seaweed extract (*A. nodosum*) and in soil near field capacity; and T4 - plants inoculated via seed with *A. brasilense* + foliar spray of seaweed extract (*A. nodosum*) and in soil near field capacity; T5 - plants exposed to waterlogged soil (waterlogged control); T6 - plants inoculated via seed with *A. brasilense* and exposed to waterlogged soil; T7 - plants subjected to foliar spray of seaweed extract (*A. nodosum*) and exposed to waterlogged soil; and T8 - plants inoculated via seed with *A. brasilense* + foliar spray of seaweed extract (*A. nodosum*) and exposed to waterlogged soil at the beginning of pod development (R3). The experimental plot consisted of 12-liter pots with two plants per replicate. Foliar application of seaweed extract occurred at phenological stages V5 and R1. Ten and 20 days after imposition of waterlogging, samples were collected for anatomical, biometric, and physiological evaluations of gas exchange. Production evaluations were performed at the end of the cycle. Soil waterlogging impaired photosynthetic activity, photosynthetic pigments, SPAD index, and foliar nitrogen and phosphorus contents. Although bioinputs did not directly contribute to the maintenance of these factors, they contributed positively to other variables, reducing the impacts of stress on production. Foliar application of seaweed extract (*A. nodosum*) was more effective in preserving biometric and productive characteristics, minimizing losses. On the other hand,

inoculation with *A. brasilense* showed less significant responses in mitigating the negative effects. Anatomical analysis revealed root acclimation to waterlogging. Inoculation with *A. brasilense* increased root diameter and the number of metaxylems, suggesting stimulation of root development. Foliar application of seaweed extract, alone or combined with *A. brasilense*, promoted an increase in the diameter of the central cylinder and the number of metaxylems, indicating an improvement in the conduction of water and nutrients.

Keywords: *Glycine max* L. *Ascophyllum nodosum*. Hypoxia.

Lista de figuras

- Figura 1. Imposição do encharcamento do solo. Fonte: Raízes de plantas durante as coletas para avaliação biométrica e anatômica, 10 e 20 dias após a imposição do encharcamento. Raízes (A) e (C) plantas sem encharcamento; raízes (B) e (D) com encharcamento; aerênquimas (E) e aspecto esponjoso (F). Fonte: arquivo pessoal da autora.32
- Figura 2. Detalhe da amostragem das raízes para os cortes anatômicos. Fonte: arquivo pessoal da autora.33
- Figura 3. Secção transversal de raiz da soja (*Glycine max* L.): diâmetro da raiz (DR), diâmetro do cilindro central (DCC), número de metaxilemas (Metaxilemas), diâmetro do metaxilema (DMTX), espessura da epiderme (EEPID), endoderme (EENDO) e do parênquima cortical (Esp. CórTEX), de segmentos de raízes de plantas de soja. Fonte: arquivo pessoal da autora.34
- Figura 4. Raízes de plantas durante as coletas para avaliação biométrica e anatômica, 10 e 20 dias após a imposição do encharcamento. Raízes (A) e (C) plantas sem encharcamento; raízes (B) e (D) com encharcamento; aerênquimas (E) e aspecto esponjoso (F). Fonte: Raízes de plantas durante as coletas para avaliação biométrica e anatômica, 10 e 20 dias após a imposição do encharcamento. Raízes (A) e (C) plantas sem encharcamento; raízes (B) e (D) com encharcamento; aerênquimas (E) e aspecto esponjoso (F). Fonte: arquivo pessoal da autora.51
- Figura 5. Aspecto clorótico das folhas de plantas de soja aos 20 dias de encharcamento do solo. (A) plantas submetidas ao encharcamento e (B) plantas sem encharcamento (controle). Fonte: arquivo pessoal da autora.66

Listas de tabelas

Tabela 1- Características químicas das amostras de solo do LATOSSOLO VERMELHO eutroférico utilizado para o preenchimento dos vasos para implantação. Marechal Cândido Rondon,2023.....	30
Tabela 2- Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio da altura de plantas (ALT), diâmetro de caule (DIAM), número de folhas (NF), área foliar (AF), massa seca de folhas (MSF) massa seca de parte aérea (MSPA), massa seca de parte aérea (MSPA) e massa seca de raízes (MSR) de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	37
Tabela 3- Médias de altura de plantas (ALT), diâmetro de caule (DIAM), número de folhas (NF), área foliar (AF), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.....	38
Tabela 4- Médias da massa seca de folha (MSF), raízes (MSR) e parte aérea (MSPA), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	39
Tabela 5- Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio da altura de plantas (ALT), diâmetro de caule (DIAM), número de folhas (NF), área foliar (AF), massa seca de folhas (MSF) massa seca de parte aérea (MSPA) e massa seca de raízes (MSR) de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	40
Tabela 6- Médias de área foliar (AF), altura de plantas (ALT) e diâmetro de caule (DIAM), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	40
Tabela 7- Médias de massa seca de parte aérea (MSPA) e número de folhas (NF), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	41

Tabela 8- Médias de massa seca de raízes (MSR) e massa seca de folhas (MSF), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	43
Tabela 9- Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio do diâmetro de raiz (DR), diâmetro do cilindro central (DCC), número de metaxilemas (Nmtx), diâmetro de metaxilema (Dmtx), espessura da epiderme (EEPID), espessura da endoderme (EENDO) e espessura do córtex (ECORTEX), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	44
Tabela 10- Médias do diâmetro de raiz (DR), diâmetro do cilindro central (DCC), número de metaxilemas (Nmtx), diâmetro de metaxilema (Dmtx), espessura da epiderme (EEPID), espessura da endoderme (EENDO), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	45
Tabela 11- Médias da espessura do córtex (ECTEX), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	46
Tabela 12- Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio do diâmetro de raiz (DR), diâmetro do cilindro central (DCC), número de metaxilemas (Nmtx), diâmetro de metaxilema (Dmtx), espessura da epiderme (EEPID), espessura da endoderme (EENDO) e espessura do córtex (ECTEX), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	47
Tabela 13- Médias do diâmetro de raiz (DR), diâmetro do cilindro central (DCC), diâmetro de metaxilema (Dmtx), espessura da epiderme (EEPID), espessura da endoderme (EENDO) e espessura do córtex (ECTEX), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	48

Tabela 14- Média do número de metaxilemas (Nmtx), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	49
Tabela 15- Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio dos teores foliares de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	52
Tabela 16- Médias dos teores foliares de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	53
Tabela 17- Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio dos teores foliares de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	53
Tabela 18- Médias dos teores foliares de fósforo (P) e potássio (K), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	54
Tabela 19- Média dos teores foliares de nitrogênio de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	55
Tabela 20- Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio dos teores de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) de grão, de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.....	55
Tabela 21- Médias dos teores de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) de grão, de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	56

Tabela 22. Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio do índice SPAD, teor de clorofila <i>a</i> (Chl <i>a</i>), teor de clorofila <i>b</i> (Chl <i>b</i>), teor total de clorofila (<i>a+b</i>), relação de clorofila <i>a/b</i> e teor de carotenoides (Car), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	58
Tabela 23. Médias do teor de clorofila <i>a</i> (Chl <i>a</i>), teor de clorofila <i>b</i> (Chl <i>b</i>), teor total de clorofila (<i>a+b</i>), relação de clorofila <i>a/b</i> e teor de carotenoides (Car), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	59
Tabela 24. Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio do índice SPAD, teor de clorofila <i>a</i> (Chl <i>a</i>), teor de clorofila <i>b</i> (Chl <i>b</i>), teor total de clorofila (<i>a+b</i>), relação de clorofila <i>a/b</i> e teor de carotenoides (Car), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	60
Tabela 25. Médias do índice SPAD, teor de clorofila <i>a</i> (Chl <i>a</i>), teor de clorofila <i>b</i> (Chl <i>b</i>), teor total de clorofila (<i>a+b</i>), relação de clorofila <i>a/b</i> e teor de carotenoides (Car), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	61
Tabela 26- Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio da taxa de assimilação líquida de CO ₂ (<i>A</i>), taxa de transpiração (<i>E</i>), condutância estomática (<i>gs</i>), concentração interna de CO ₂ (<i>C_i</i>), eficiência no uso da água (<i>A/E</i>), eficiência intrínseca no uso da água (<i>A/g_s</i>) e eficiência instantânea de carboxilação (<i>A/C_i</i>), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	62
Tabela 27- Médias da taxa de assimilação líquida de CO ₂ (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)(<i>A</i>), taxa de transpiração (μmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)(<i>E</i>), condutância estomática (mol m ⁻² s ⁻¹)(<i>gs</i>), concentração interna de CO ₂ (μmol CO ₂ mol ⁻¹) (<i>C_i</i>), eficiência no uso da água (<i>A/E</i>), eficiência intrínseca no uso da água (<i>A/g_s</i>) e eficiência instantânea de carboxilação (<i>A/C_i</i>), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com	

encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	63
Tabela 28- Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio da taxa de assimilação líquida de CO ₂ (<i>A</i>), taxa de transpiração (<i>E</i>), condutância estomática (<i>gs</i>), concentração interna de CO ₂ (<i>C_i</i>), eficiência no uso da água (<i>A/E</i>), eficiência intrínseca no uso da água (<i>A/g_s</i>) e eficiência instantânea de carboxilação (<i>A/C_i</i>), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	64
Tabela 29- Médias da taxa de assimilação líquida de CO ₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)(<i>A</i>), taxa de transpiração ($\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)(<i>E</i>), condutância estomática ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)(<i>gs</i>), concentração interna de CO ₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$) (<i>C_i</i>), eficiência no uso da água (<i>A/E</i>), eficiência intrínseca no uso da água (<i>A/g_s</i>) e eficiência instantânea de carboxilação (<i>A/C_i</i>), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	65
Tabela 30- Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio do número de grãos (NGRA), número de nós (NNÓS), números de galhos (NGAL), número de vagens (NVAG), produção por planta (PROD), altura de plantas (ALT), número de grãos por vagem (Ng/Vg), massa de mil grãos (MMG) e a altura da primeira vagem (A1vag), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos. Marechal Cândido Rondon - PR, 2023-2024.	67
Tabela 31- Médias do número de grãos (NGRA), número de nós (NNOS), números de galhos (NGAL), número de grãos por vagem (Ng/Vg), massa de mil grãos (MMG) e altura da primeira vagem (A1vag), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	68
Tabela 32- Médias da altura de plantas (ALT), número de vagens (NVAG) e produção por planta (PROD), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.	69

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 PLANTAS EM AMBIENTE RADICULAR EM CONDIÇÕES DE DEFICIÊNCIA DE OXIGÊNIO	21
2.2 <i>Azospirillum brasilense</i>	24
2.3 EXTRATOS DE ALGA DE <i>Ascophyllum nodosum</i>	25
3. MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	30
3.2 IMPLANTAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO	31
3.3 AVALIAÇÕES	32
3.3.1 VARIÁVEIS BIOMÉTRICAS	32
3.3.2 VARIÁVEIS ANATÔMICAS	33
3.3.3 ANÁLISE FOLIAR E DE GRÃOS DOS TEORES NUTRICIONAIS	35
3.3.4 TEORES DOS PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS E TROCAS GASOSAS	35
3.3.5 VARIÁVEIS DE PRODUÇÃO	36
3.3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1 VARIÁVEIS BIOMÉTRICAS	37
4.2 VARIÁVEIS ANATÔMICAS	43
4.3 ANÁLISE FOLIAR E DE GRÃOS DOS TEORES NUTRICIONAIS	52
4.4 TEORES DOS PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS E TROCAS GASOSAS	58
4.5 VARIÁVEIS DE PRODUÇÃO	67
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	71

6. CONCLUSÕES	72
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

1.INTRODUÇÃO

A cultura da soja apresenta grande importância na agricultura brasileira. Em função de sua importância econômica, há busca constante por novos estudos para investigar técnicas que mitiguem os efeitos negativos de estresses relacionados a condições ambientais desfavoráveis.

Com as mudanças climáticas, os eventos extremos estão se tornando cada vez mais frequentes, resultando em períodos prolongados de estiagem ou de intensas chuvas. Essas condições representam desafios significativos para a produção agrícola mundial. O encharcamento do solo é o segundo principal estresse abiótico, após o déficit hídrico, que prejudica o desenvolvimento da cultura da soja (PLOSCHUK; MIRALLES; STRIKER, 2022). Quanto ao encharcamento, seus efeitos negativos podem gerar perdas na eficiência fotossintética, fixação biológica de nitrogênio e no rendimento que ultrapassam 40% (ADEGOYE et al., 2023; NGUYEN et al., 2012; PLOSCHUK; MIRALLES; STRIKER, 2022).

O encharcamento do solo é um fenômeno que ocorre em muitas regiões no mundo. No Brasil, estima-se que 28 milhões de hectares são propensos a inundação (GARCIA et al., 2020) e a sua ocorrência está localizada principalmente nos estados do sul (terras baixas), devido à alta incidência de chuvas juntamente com a topografia plana, lençóis freáticos rasos e a má drenagem dos solos argilosos (GARCIA et al., 2020; PLOSCHUK; MIRALLES; STRIKER, 2022).

Quando ocorre encharcamento do solo há redução de espaço poroso ocupado por oxigênio e conseqüentemente tem-se uma menor taxa de respiração radicular. Diante da situação de hipóxia, onde há baixa concentração de oxigênio, ocorre a supressão da respiração radicular e aumento fermentação (TAIZ et al., 2017). Esse processo desencadeia uma série de efeitos negativos para as plantas, como o aumento da produção de etileno, de espécies reativas de oxigênio, acúmulo de metabolitos tóxicos, redução da absorção de nutrientes e da atividade fotossintética (SRIVASTAVA et al., 2024).

Uma alternativa para minimizar os efeitos negativos da condição de solo encharcado em plantas de soja consiste no uso de bioestimulantes, como o extrato de algas marinhas de *Ascophyllum nodosum*. Estes extratos contêm em sua composição, auxinas, giberelinas e citocininas, que além de atuarem no alongamento e divisão celular, têm vários efeitos no crescimento e desenvolvimento de plantas

(TAIZ et al., 2017), apresentando também efeitos antioxidantes, importantes fatores de mitigação de estresse abióticos (SILVA et al., 2023).

Outra alternativa para minimizar os efeitos negativos do encharcamento consiste na inoculação das plantas com bactérias promotoras de crescimento vegetal (GUIMARÃES et al., 2017). Neste contexto, destaca-se a espécie *Azospirillum brasilense*, conhecida por promover maior crescimento radicular, secretar hormônios vegetais, como auxinas, giberelinas e citocininas, e atuar na mitigação de estresses bióticos e abióticos (BULEGON et al., 2019a, 2019b).

A prática da inoculação de *A. brasilense* e aplicação de *A. nodosum* podem contribuir para mitigar o efeito negativo no desenvolvimento da soja, em solo encharcado. Isto ocorre devido ao maior desenvolvimento das plantas pelo estímulo da síntese e manutenção da atividade de moléculas de clorofila nas folhas (DE SAEGER et al., 2020; SHUKLA et al., 2018; PEREIRA et al., 2020), contribuindo para maior atividade fotossintética (ALIZADEH et al., 2022; BULEGON et al., 2019b; DO ROSÁRIO ROSA et al., 2021; SUJATA et al., 2023). Desta forma, ocorre maior acúmulo de matéria seca nas plantas, incremento dos componentes da produção e rendimento de grãos (CASSÁN; DIAZ-ZORITA, 2016; PEREIRA et al., 2020).

Considera-se então, como hipótese deste estudo, que plantas de soja inoculadas com *A. brasilense* e tratadas com *A. nodosum*, via pulverização foliar, têm minimização de efeitos negativos em processos bioquímicos e fisiológicos provenientes do encharcamento do solo.

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivos investigar a mitigação dos efeitos negativos do estresse por encharcamento em plantas de soja, pela inoculação de sementes com *Azospirillum brasilense* e aplicação foliar de extrato de algas (*Ascophyllum nodosum*).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A soja é um dos pilares na economia global, atuando como uma das principais fontes de proteína e óleo vegetal (DALL'AGNOL, 2016). A produção mundial está estimada em 420,87 milhões de toneladas em uma área cultivada correspondente a 146,71 milhões de hectares (EMBRAPA, 2025). O seu cultivo e exportação proporciona segurança alimentar, como também impulsiona a economia, com um mercado que movimenta bilhões de dólares anualmente. Países como os Estados Unidos, Brasil e Argentina são líderes na produção e exportação, com impactos significativos em suas balanças comerciais (EMBRAPA, 2025; FAOSTAT, 2022; MINISTÉRIO DA FAZENDA, 2024).

No Brasil, a soja desempenha um papel crucial, sendo o maior produto agrícola do país em termos de valor de exportação (SECRETARIA DE COMÉRCIO EXTERIOR, 2024). Segundo dados da CONAB (2025) a safra 24/25 foram semeados uma área correspondente a 47,515 milhões ha, a produtividade média alcançou 3.533 kg/ha⁻¹ e a produção total da safra foi estimada em 167,869 milhões t. O estado do Paraná, é o terceiro maior estado que semeou soja na safra 24/25, correspondendo a 5,8 milhões ha⁻¹ e o terceiro maior produtor dos grãos correspondendo a 22 milhões toneladas (DERAL, 2024). Deste modo, a cultura da soja contribui de forma significativa para o PIB brasileiro, gerando emprego e renda para muitas famílias, como também sustenta indústrias de fertilizantes, transporte, maquinário agrícola entre outras.

2.1 PLANTAS EM AMBIENTE RADICULAR EM CONDIÇÕES DE DEFICIÊNCIA DE OXIGÊNIO

O encharcamento do solo é uma das condições ambientais desfavoráveis para o desenvolvimento da cultura da soja. As plantas sob condição de hipóxia, apresentam uma série de respostas negativas como a redução da taxa de respiração radicular, aumento da produção de etileno, redução da absorção de nutrientes e da atividade fotossintética (BORELLA et al., 2013; CECATTO JÚNIOR et al., 2022; SAIRAM et al., 2008; SOUSA; SODEK, 2002).

Inicialmente a produção de energia fica concentrada nas reações de glicólise, porém, a glicólise não continua por muito tempo, pois o suprimento de NAD⁺ (nicotinamida adenina dinucleotídeo oxidado) é limitado. Para contornar esta limitação

a planta prossegue para a metabolização do piruvato, realizando a fermentação do ácido láctico e depois a fermentação alcoólica (BANTI et al., 2013; SAIRAM et al., 2008; TAIZ et al., 2017). O produto da fermentação do ácido láctico é o lactato, este se acumula e promove a acidificação do citosol. Na fermentação alcoólica o produto é o etanol, acredita-se que seja um produto menos tóxico para as plantas, pois pode ser exportado via xilema para a parte aérea e se difundir para fora da célula (BORELLA et al., 2013; TAIZ et al., 2017; VITOR; SODEK, 2019). Porém, ao sair da célula, este etanol é transportado para as folhas onde na presença do oxigênio é convertido em acetaldeído e ácido acético que podem chegar a níveis tóxicos e provocar lesões celulares (DREW, 1997).

Estas mudanças metabólicas geram alguns prejuízos às plantas, pois podem provocar o esgotamento energético, pois a produção de energia é reduzida de 36 moléculas de ATP para 2, via glicólise (BORELLA et al., 2013). Além disso, o aumento da taxa de fermentação láctica e alcoólica causa o processo de acidificação do citosol pelo acúmulo do lactato e toxicidade pelo excesso de acetaldeído e ácido acético (DREW, 1997; TAIZ et al., 2017). Sendo que acetaldeído e ácido acético provocam lesões nas folhas e deixa-as com aspecto clorótico. Existem outros fatores que podem contribuir para a toxidez sendo eles a produção de radicais livres e o aumento na concentração de etileno nas folhas (BANTI et al., 2013; HARTMAN et al., 2019).

Ainda vale destacar, que em condições de hipóxia dos tecidos radiculares há um aumento da síntese de ACC (ácido 1-carboxílico-1-aminociclopropano) e etileno. O etileno, um dos primeiros indicadores de que há o estresse por encharcamento, regula diversas respostas adaptativas moleculares, químicas e morfológicas (SRIVASTAVA et al., 2024). No entanto, este hormônio pode exercer duplo papel, dependendo dos níveis endógenos, tipo de planta e órgão, pode atuar tanto de forma benéfica quanto prejudicial às condições de estresse (GAMALERO; GLICK, 2012; FATMA et al., 2022; SHARMA et al., 2019).

Relatos da literatura, porém, destacam que a concentração elevada de etileno nas folhas se torna prejudicial, pois desencadeia um aumento na atividade da enzima clorofilase e oxidase que conseqüentemente levam a degradação das moléculas de clorofila, tornando as folhas cloróticas (ANDRADE SILVA et al., 2023; CECATTO JÚNIOR et al., 2022; GAMALERO; GLICK, 2012; PASSOS et al., 2015).

As plantas podem desenvolver aerênquimas, que são estruturas localizadas no caule e nas raízes que formam canais interconectados, preenchidos com gases e

proporcionam uma rota de baixa resistência ao movimento do oxigênio (SAIRAM et al., 2008). Além do desenvolvimento de aerênquimas, o etileno e a giberelina regulam a formação, o número e o comprimento das raízes adventícias sinergicamente (KIM et al., 2015, 2018). Essas raízes, por estarem conectadas ao caule próximo ao local de formação dos aerênquimas, têm maior disponibilidade de oxigênio em comparação com um sistema radicular submerso (SAIRAM et al., 2008).

Além disso, Kim et al. (2018) relatam que a aplicação exógena de etileno nas doses de 50 μ M, 100 μ M, e 200 μ M, em plantas de soja encharcadas, estimulou o acúmulo de giberelina o que melhorou a área radicular ao comparar com plantas sem a aplicação. Neste contexto, Srivastava et al. (2024) relata que os genótipos de soja mais tolerantes ao encharcamento produzem maiores níveis de etileno endógeno em comparação com os suscetíveis.

Corroborando com o estudo de Srivastava et al. (2024), no estudo de KIM et al. (2015), ao avaliarem o comportamento de dois genótipos de soja, uma tolerante e a outra não tolerante ao encharcamento, foi observado que a variedade tolerante apresentou tendência de elevação nos teores de giberelina, maiores níveis de etileno endógeno e metionina, precursora do etileno, ainda, observou que os teores de ácido abscísico (ABA) foram menores. Em condições de estresse o ABA é responsável pela indução a deposição de suberina, porém, em condições de encharcamento é necessário a “dessuberização” da célula para a formação de aerênquimas, induzida pelo etileno, portanto, a biossíntese de suberina é suprimida pela regulação negativa de ABA, sugerindo que este balanço negativo é benéfico para o desenvolvimento das plantas tolerante em solo encharcado (KIM et al., 2015).

Outro problema presente em plantas sob encharcamento é a presença da resistência ao fluxo de massa de água pela raiz. Esta resistência se deve pela deposição de suberina ou lignina nos tecidos radiculares, esta deposição possui a finalidade de evitar perdas de oxigênio e impedir a absorção de toxinas ou gases tóxicos, porém, esta adaptação prejudica a condutividade hidráulica dos tecidos radiculares ao reduzir a atividade das aquaporinas (AROCA; PORCEL; RUIZ-LOZANO, 2012; SAIRAM et al., 2008; SOUSA; SODEK, 2002). Com a redução da condutividade hidráulica reduz-se o potencial água das plantas, em consequência tem-se a maior produção de ABA nas folhas, que leva ao fechamento estomático e com isso há uma redução da atividade fotossintética (SOUSA; SODEK, 2002; TAIZ et al., 2017).

A redução da taxa fotossintética leva a uma diminuição nos fotoassimilados utilizados no desenvolvimento das plantas. Com isso as plantas apresentam redução no acúmulo de massa seca e até na produção de grãos. Em trabalho realizado por Cecatto Júnior et al. (2022), observaram que as plantas de soja submetidas ao encharcamento obtiveram redução no acúmulo de massa seca de parte aérea e radicular, tendo reduções da ordem de 38 e 20%, respectivamente, ao comparar com plantas sob irrigação normal. Ainda vale destacar, que as plantas também apresentaram reduções no número de vagens por planta, massa de cem grãos e produção de grãos por planta na ordem de 40, 34 e 42%, respectivamente, quando comparadas com plantas sob irrigação regular a pleno sol.

2.2 *Azospirillum brasilense*

Esta bactéria é caracterizada por ser associativa facultativa, isto é, prolifera-se na superfície radicular e pode também penetrar no vegetal (DÖBEREINER; BALDANI, 1982). A inoculação de *A. brasilense* estimula o crescimento das plantas, promove maior crescimento do sistema radicular, conseqüentemente, promove maior exploração do solo (HUNGRIA et al., 2010; RONDINA et al., 2020). Este estímulo para o crescimento e desenvolvimento das plantas se deve ao fato de as bactérias secretarem hormônios vegetais, como auxinas, giberelinas e citocininas (CASSÁN; VANDERLEYDEN; SPAEPEN, 2014; GUIMARÃES et al., 2017; GUPTA et al., 2015). Além da promoção de crescimento a inoculação de *A. brasilense* está associada também na mitigação de estresses abióticos como o déficit hídrico (BULEGON et al., 2019a, 2019b; NAOE et al., 2020) e salino (FUKAMI et al., 2018).

Shimoia et al. (2023) relatam que plantas de soja submetidas ao encharcamento no estágio V₈ e coinoculadas com *Bradyrhizobium* (*Bradyrhizobium elkani* e *B. japonicum*) e *A. brasilense* ou *Bradyrhizobium* e *Rhizophagus intraradices*, apresentaram menores reduções do peso seco de raízes e mantiveram a área foliar, evidenciando que a coinoculação pode ter melhorado o metabolismo do nitrogênio e o crescimento da planta resultando em maior tolerância ao alagamento.

Para compreender os benefícios da inoculação de *A. brasilense* em soja, em condição de solo encharcado, observa-se estímulo na formação de tecidos radiculares com menor permeabilidade e conseqüentemente redução da absorção de água e nutrientes. Assim, a inoculação com *A. brasilense* pode mitigar o estresse ao estimular

o crescimento das raízes, proporcionando maior área de absorção de íons (HUNGRIA et al., 2010; MORETTI et al., 2020; RONDINA et al., 2020), associada a maior permeabilidade de membrana o que facilita a entrada de água e nutrientes nos tecidos radiculares (VURUKONDA et al., 2016), resultando na maior absorção de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio e água por plantas inoculadas com *A. brasilense* (HUNGRIA et al., 2010).

A inoculação de *A. brasilense* também pode favorecer o desenvolvimento de plantas em condição de solo encharcado ao ser uma prática capaz de reduzir o teor de etileno endógeno (OLIVEIRA et al., 2003; GAMALERO; GLICK, 2012), pois plantas em condição de solo encharcado apresentam aumento da produção e acúmulo de etileno, que em determinados níveis podem causar redução do teor de clorofila e a abscisão de órgão distais com a evolução do estresse (GAMALERO; GLICK, 2012).

2.3 EXTRATOS DE ALGA DE *Ascophyllum nodosum*

O extrato de *Ascophyllum nodosum* é obtido a partir de uma macroalga marinha conhecida como marrom, pertencente à família Fucaceae da ordem Fucales. Esta espécie é comum das águas do Atlântico Norte, se estendendo desde a costa da América do Norte (Canadá até Nova Iorque) até a costa noroeste da Europa (Portugal) (PEREIRA et al., 2020).

O *A. nodosum* é explorado para fins comerciais desde a década de 1950, para usos desde a indústria até a agricultura. É usado na indústria alimentícia, de fertilizantes, na nutrição animal, produtos de limpeza e até cosméticos. É uma fonte de macro e micronutrientes, como fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), boro (B), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn). Além disso, contém aminoácidos, citocininas, auxinas e compostos fenólicos. Essas substâncias afetam o metabolismo celular das plantas, melhorando a capacidade de absorção de nutrientes, que promovem o crescimento e aumentam a produtividade (ERTANI et al., 2018; PEREIRA et al., 2020).

Os extratos de *A. nodosum* já são conhecidos por promoverem o crescimento de plantas, por conter em sua composição citocininas, auxinas e giberelinas, que atuam na divisão celular, e de mitigar diversos estresses abióticos, atuando na regulação dos processos bioquímicos e moleculares (MÓGOR; MÓGOR, 2022). Os benefícios da aplicação de extratos de *A. nodosum* se estendem desde o aumento da

germinação, crescimento radicular, biomassa de parte aérea (JOSHI-PANERI; CHAMBERLAND; DONNELLY, 2020; SHUKLA et al., 2019) , melhor eficiência no uso de nutrientes (KUMARI et al., 2023; SHUKLA et al., 2019) até ao aumento nos teores de clorofila, atividade fotossintética, tolerância ao estresse abióticos e bióticos, devido aos efeitos antioxidantes (DI STASIO et al., 2018; SHUKLA et al., 2019) , ou seja, reduzindo os efeitos nocivos das espécies reativas de oxigênio (ROS) (DE SAEGER et al., 2020; MÓGOR; MÓGOR, 2022; PEREIRA et al., 2020; SIBLE; SEEBAUER; BELOW, 2021).

Com relação aos estresses bióticos, o uso de extratos de *A. nodosum* apresenta resultados positivos contra doenças foliares e no controle de nematoides. Com relação aos nematoides, estudos realizados na cultura da soja e do tomate verificou-se que o uso de extratos de *A. nodosum* reduziu o número de galhas causadas pelo *Meloidogyne incógnita* (RADWAN et al., 2012) e foi eficaz na redução da densidade populacional de *Meloidogyne javanica* na soja e na eclosão in vitro de ovos (RINALDI et al., 2021, 2023).

Com relação a doenças foliares no estudo de Ali; Ramsubhag; Jayaraman (2019), ao estudar a eficácia do *A. nodosum* contra doenças foliares no pimentão e no tomate causadas por *Xanthomonas campestris* pv. *vesicatoria* e *Alternaria solani*, verificou-se que as aplicações foliares de 0,5% de extrato de *A. nodosum* reduziram a incidência da doença pelos patógenos em ambas as culturas em casa de vegetação e a campo, e se verificou aumentos nos parâmetros de crescimento (altura, comprimento de raiz, massa seca, teor de clorofila entre outros). Além disso, a combinação de *A. nodosum* com uma baixa dose de fungicida de contato também apresentou redução de 60% da doença e aumento de 57% da produção.

Ainda no estudo Ali; Ramsubhag; Jayaraman (2019), foi realizado a investigação dos mecanismos de supressão da doença e foi observado que o extrato induziu a atividade das enzimas relacionadas a defesa, como a fenilalanina amônia liase, peroxidase, polifenol oxidase, quitinase e β -1,3-glucanase e os níveis de compostos fenólicos totais. Com relação a expressão de genes nas vias de defesa e sinalização, também foi observado aumento na expressão desses genes quando as plantas foram tratadas com extratos de *A. nodosum*, sendo também associado a um aumento acentuado nos transcritos de genes envolvidos na biossíntese de auxina (IAA), giberelina (Ga2Ox) e citocinina (IPT).

Em condições de déficit hídrico, a aplicação foliar de extratos de *A. nodosum* aumentou a tolerância da soja em condições estressantes. Observou-se menores perdas na atividade fotossintética e produtividade das plantas (ALIZADEH et al., 2022; MARTYNENKO et al., 2016; DO ROSÁRIO ROSA et al., 2021; SUJATA et al., 2023). Segundo Shukla et al. (2018) isto ocorre por alterações na fisiologia e a expressão gênica das plantas.

Com relação aos estresses térmicos, como altas temperaturas, em trabalho realizado na cultura da soja verificou-se que o uso de extrato de *A. nodosum* atenuou os efeitos causados pelo estresse, melhorando as características morfológicas, fisiológicas e bioquímicas. Neste estudo a assimilação de carbono e a condutância estomática foi mantida e houve aumento da atividade de enzimas antioxidantes como a superóxido dismutase, catalase e ascorbato peroxidase e manteve a atividade de peroxidase, nitrato redutase e da prolina, que auxiliaram na mitigação do estresse e refletiu no aumento de massa e produção de grãos (REPKE et al., 2022).

Outro resultado positivo foi encontrado no estudo de Engel et al. (2023), onde ao avaliarem duas concentrações do extrato de *A. nodosum* (0,25% e 0,50%) na soja, observou-se aumento das características biométricas, sendo a massa de folhas e caules, número de vagens e sementes, peso de vagens e sementes e na produtividade, das plantas tratadas em ambas as concentrações (ENGEL et al., 2023).

Em outras culturas também são encontrados resultados benéficos do uso do extrato de *A. nodosum*, como em tomateiro sob estresse salino ou déficit hídrico o uso do extrato de algas melhorou as relações hídricas e as características de qualidade do fruto (AHMED et al., 2022; DI STASIO et al., 2018).

No trabalho de Alizadeh et al. (2022), na cultura do feijoeiro sob déficit hídrico e diferentes concentrações do extrato de *A. nodosum*, mostrou que a aplicação do extrato nas concentrações de 0,2 e 0,4% promoveram aumento no número de folhas, peso seco de raiz e nos teores de clorofila a, b e total em comparação ao controle (não estressado), porém, quando em estresse hídrico as características avaliadas pelo autor apresentam diminuições significativas, mostrando que a aplicação foliar do extrato não desempenhou o papel na mitigação dos efeitos negativos causados pelo estresse hídrico.

Assim como no trabalho de Hoang; Stephenson (2024) ao avaliarem a soja sob estresse salino, o extrato de *A. nodosum* não estimulou a atividade da peroxidase (POD), somente melhorou algumas características biométricas radiculares.

Diferentemente do trabalho de Cordeiro et al. (2024), onde a aplicação do extrato de *A. nodosum* na soja em diferentes fases do déficit hídrico, observou-se que a aplicação três dias antes do estresse melhorou a atividade da enzima nitrato redutase, o teor de clorofila e prolina, diminuiu a peroxidação lipídica e melhorou a atividade da enzima peroxidase, e na aplicação já em condições de estresse houve aumento expressivo do conteúdo de prolina, melhoria da atividade das enzimas superóxido dismutase e catalase e redução da degradação da clorofila.

No estudo de Silva et al. (2023) ao avaliarem a aplicação foliar de *A. nodosum* em diferentes estádios fenológicos da soja, obtiveram o resultado de que os tratamentos não influenciaram nas variáveis avaliadas, sendo elas as biométricas e de produção. Estes resultados evidenciam que as respostas do extrato de algas podem variar entre culturas, cultivares, locais e época de aplicação (SHUKLA et al., 2019).

Andrade Silva et al. (2023), investigaram a aplicação de diferentes bioestimulantes na soja em condição de hipóxia, sendo eles lisina, triptofano, metionina, betaína-glicina, histidina, arginina, leucina, aparagina, alanina, ácido glutâmico, prolina, fenilamina, serina, valina, extrato de aminoácidos e extrato de algas. Estes verificaram que a condição de hipóxia reduziu a concentração de clorofila, número de ramos, massa fresca de parte aérea e produtividade. Com a aplicação do extrato de algas houve aumento no diâmetro de caule, número de ramos, massa fresca de parte aérea e produtividade, juntamente com outros bioestimulantes estudados. Porém, para o teor de clorofila, os bioestimulantes lisina, serina e histidina, apresentaram resultados superiores aos demais, evidenciando que os biostimulantes podem apresentar respostas distintas e variáveis.

Buga (2023) verificou que na cultura do repolho, sob estresse por encharcamento, a aplicação de extrato de algas e de outros bioestimulantes, não alterou significativamente o estado nutricional das plantas tratadas. Este sugere, com os resultados, que as plantas de repolho apresentam tolerância ao encharcamento.

Dessa forma, observa-se que os bioinsumos, como extratos de algas e bactérias promotoras de crescimento, promovem respostas de aclimação nas plantas sob estresse, modulando aspectos morfológicos (ALI; RAMSUBHAG; JAYARAMAN, 2019; ENGEL et al., 2023; HUNGRIA et al., 2010; SHIMOIA et al., 2023), anatômicos, fisiológicos e bioquímicos, como regulação hormonal, manutenção da fotossíntese e aumento da atividade de enzimas antioxidantes (ALIZADEH et al.,

2022; CORDEIRO et al., 2024; GAMALERO; GLICK, 2012). Estas modulações resultam em plantas mais resilientes às condições adversas do ambiente.

Vale destacar ainda que este efeito mitigador dos bioinsumos apresenta a tendência de ser mais expressivo em genótipos sensíveis, visto que, estas plantas carecem de adaptações naturais que conferem a tolerância ao estresse (BUGA, 2023). Em contrapartida, genótipos naturalmente mais tolerantes, apresentam parte dessas adaptações, como a formação de aerênquimas, controle do etileno e sistemas antioxidantes mais eficientes, o que pode reduzir sua responsividade aos bioinsumos (BUGA, 2023; SHUKLA et al., 2019).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido na Estação Experimental Professor Dr. Mário César Lopes, localizada nas coordenadas - 24°558'S e - 54°045'O, situada na Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste, Marechal Cândido Rondon – PR. Para implantação foram usados vasos com capacidade nominal de 8,7 dm³ (altura: 23 cm; diâmetro superior: 26 cm; diâmetro inferior: 19 cm) que receberam amostras de solo proveniente do horizonte A de um LATOSSOLO VERMELHO eutroférico (SANTOS et al., 2018) (Tabela 1).

De acordo com o manual de adubação e calagem para o estado do Paraná (PAULETTI; MOTTA, 2019), esse solo apresentou as seguintes características químicas: teor de fósforo muito baixo; pH (CaCl₂) alto; alumínio muito baixo; potássio em nível médio; cálcio e magnésio muito altos; CTC (pH 7,0) médio; saturação por bases alto; saturação por alumínio muito baixa; %K na CTC (pH 7,0) médio; e teores de manganês, cobre e zinco muito altos (Tabela 1).

Tabela 1- Características químicas das amostras de solo do LATOSSOLO VERMELHO eutroférico utilizado para o preenchimento dos vasos para implantação. Marechal Cândido Rondon, 2023.

P	pH	pH	H+Al	Al	K	Ca	Mg	SB	CTC (pH 7,0)
mg/dm ³	CaCl ₂	SMP	-----cmolc/dm ³ -----						
3,98	5,11	6,06	4,75	0,07	0,17	7,39	2,15	9,71	14,46
M.O	V	m	K	Ca	Mg	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	
g/dm ³	-----%-----								
40,30	67	0,7	1,2	51	15	3,4	43,5	12,6	
Fe	Mn	Cu	Zn	Areia	Silte	Argila	Classe textural		
-----mg/dm ³ -----				-----g/kg-----					
72,21	149,45	20,96	9,85	606	284	110	Muito argilosa		

O estudo foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, em esquema fatorial 2 x 4, com quatro repetições e duas plantas por repetição, em triplicata. O primeiro fator consistiu na presença e ausência do estresse por encharcamento por 20 dias. O segundo pela inoculação via sementes de *Azospirillum brasilense*; aplicação foliar de extrato de algas ACADIAN® (*Ascophyllum nodosum*); combinação dos dois tratamentos anteriores; e controle.

Dessa forma foram definidos os seguintes tratamentos: T1 - plantas conduzidas em solo próximo da capacidade de campo (controle); T2 - plantas inoculadas via

semente com *A. brasilense* e em solo próximo da capacidade de campo; T3 - plantas submetidas à pulverização foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) e em solo próximo da capacidade de campo; e T4 - plantas inoculadas via semente com *A. brasilense* + pulverização foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) e em solo próximo da capacidade de campo; T5 - plantas expostas ao solo encharcado (controle encharcado); T6 - plantas inoculadas via semente com *A. brasilense* e expostas ao solo encharcado; T7 - plantas submetidas a pulverização foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) e expostas ao solo encharcado; e T8 - plantas inoculadas via semente com *A. brasilense* + pulverização foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) e expostas ao solo encharcado.

3.2 IMPLANTAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

Os tratamentos referentes à inoculação via semente foram realizados utilizando inoculante comercial a base de *A. brasilense*, estirpes AbV5 + AbV6, na dose de 100 mL de inoculante (2×10^8 UFC mL⁻¹) para cada 50 kg sementes, as quais foram homogeneizadas e mantidas à sombra por cerca de 30 minutos. Os tratamentos referentes à aplicação via foliar foram realizados quando as plantas atingiram os estádios fenológicos V₅ e R₁, com aplicação da dose de 300 mL ha⁻¹ de produto comercial a base de *A. nodosum*. Para isso foi utilizado pulverizador costal, pressurizado com CO₂, dotado de uma barra de 3 m de largura com quatro pontas tipo leque (Magno 11002 ADGA), pressão de trabalho de 2,2 bar, vazão de 200 L ha⁻¹ e altura de aplicação de 0,5 m acima do ápice das plantas.

Para o estudo foi utilizada a cultivar de soja P96y90[®], conduzindo duas plantas por vaso, com vasos mantidos na capacidade de campo. Para a fertilização do solo foi utilizado a recomendação de adubação para experimentos em vasos, fornecendo: 150 mg dm⁻³ de K na forma de cloreto de potássio e 300 mg dm⁻³ de P na forma de super fosfato simples, o que adicionou 40 mg dm⁻³ de S e 85 mg dm⁻³ de Ca (NOVAES et al., 1991). Os tratos culturais foram realizados de forma manual de acordo com a necessidade da cultura ao longo do desenvolvimento. No estágio V₇, foi realizada a aplicação do produto comercial ATIVUM[®] (Epoconazol – 50 g/L, 5 % m/v; Fluxapiraxade – 50 g/L, 5 % m/v; Piraclostrobrina – 81 g/L, 8,1 % m/v), na dose de 800 mL ha⁻¹, com volume de calda de 100 litros.

As plantas foram conduzidas até o estágio R₃ (FEHR; CAVINESS, 1977) com suplemento adequado de água, mantendo os vasos em capacidade de campo. A

implantação do tratamento sob solo encharcado foi realizada com a manutenção do solo acima da capacidade de campo. Para isso os vasos foram imersos em lâmina de água constante de 0,15 metro. Para tanto o solo foi cavado e recoberto com lona plástica preta, com dimensões de 0,5 m x 0,5 m e 0,2 m de altura, cada tratamento foi submerso em uma lâmina d'água individualizada (Figura 1). A imposição do tratamento ocorreu por 20 dias a partir do início do desenvolvimento das vagens (R₃) da cultura.



Figura 1. Imposição do encharcamento do solo. Fonte: Raízes de plantas durante as coletas para avaliação biométrica e anatômica, 10 e 20 dias após a imposição do encharcamento. Raízes (A) e (C) plantas sem encharcamento; raízes (B) e (D) com encharcamento; aerênquimas (E) e aspecto esponjoso (F). Fonte: arquivo pessoal da autora.

3.3 AVALIAÇÕES

3.3.1 VARIÁVEIS BIOMÉTRICAS

As avaliações biométricas foram realizadas aos 10 e 20 dias de encharcamento, determinando a altura de planta com auxílio de uma régua graduada, medindo-se do solo até a máxima altura da gema apical e diâmetro basal de caule, utilizando paquímetro digital.

Em seguida as plantas foram seccionadas em diferentes partes. A área foliar foi mensurada com auxílio de Area meter da Licor, modelo Li-3100C. As diferentes partes da planta foram acondicionadas em sacos de papel tipo kraft e levadas a estufa de circulação forçada de ar para secagem a 65°C por 72 horas ou até atingir massa constante. Posteriormente as amostras foram pesadas em balança analítica de precisão, determinando-se a massa de matéria seca de raízes, massa de matéria seca de folhas, massa de matéria seca de caule + pecíolos.

3.3.2 VARIÁVEIS ANATÔMICAS

Aos 10 e 20 dias de encharcamento foram coletadas amostras de raízes para avaliações anatômicas (Figura 2). O material foi coletado durante a manhã, sanitizado e acondicionado em FAA 50% (Formaldeído, ácido acético e álcool etílico) durante 48 horas em geladeira. Após esse período, as amostras foram retiradas da solução FAA 50% e armazenadas no álcool 70%, na geladeira, para a realização dos cortes anatômicos (JOHANSEN 1941).

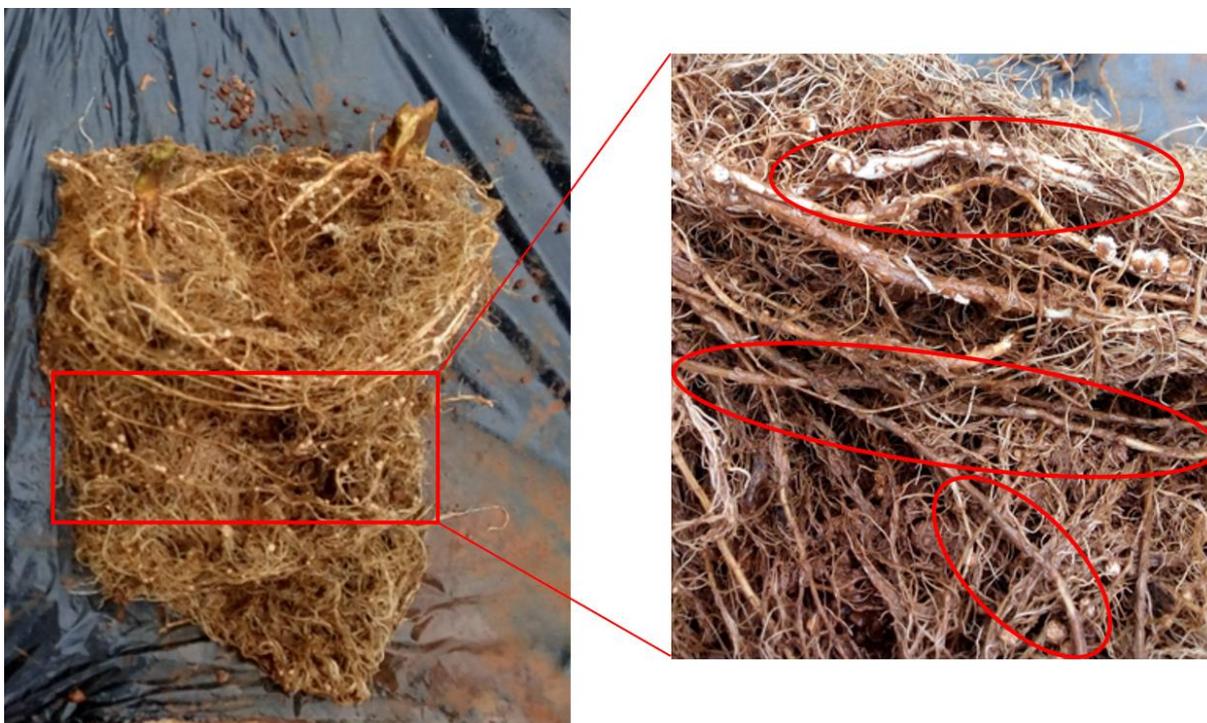


Figura 2. Detalhe da amostragem das raízes para os cortes anatômicos. Fonte: arquivo pessoal da autora.

O material foi cortado e descolorido em hipoclorito de sódio. Em seguida foi colorido com três gotas de Azul de Alcian e agitado por 1 minuto, sendo então lavado com água destilada três vezes e em seguida foi colorido com duas gotas de Fucsina Básica e agitado por 30 segundos, sendo o material lavado novamente (KRAUS; ARDUIN 1997). Os melhores cortes foram montados em lâmina semipermanente com glicerina e observados no microscópio óptico nos aumentos de 40x e 100x. O material então foi fotografado com o auxílio do microscópio óptico acoplado com câmera (modelo CMOS – Bioptika), e conectado ao computador, com auxílio do programa computacional TCCapture 4.3.0.605. As avaliações anatômicas foram realizadas com auxílio do programa Image Pro Plus 6.0 nos aumentos de 40x.

As variáveis anatômicas avaliadas nas raízes foram: diâmetro da raiz, diâmetro do cilindro central, número de metaxilemas, diâmetro do metaxilema, espessura da epiderme, endoderme e do parênquima cortical (Figura 3) (MOCHIZUKI et al., 2013; VALLIYODAN et al., 2014). A partir das imagens obtidas foi selecionado as quatro melhores para cada parcela, e cada variável foi mensurada uma vez em locais distintos, exceto para o diâmetro de metaxilema que foi mensurado em cinco locais distintos em cada imagem, gerando um valor médio para cada imagem.

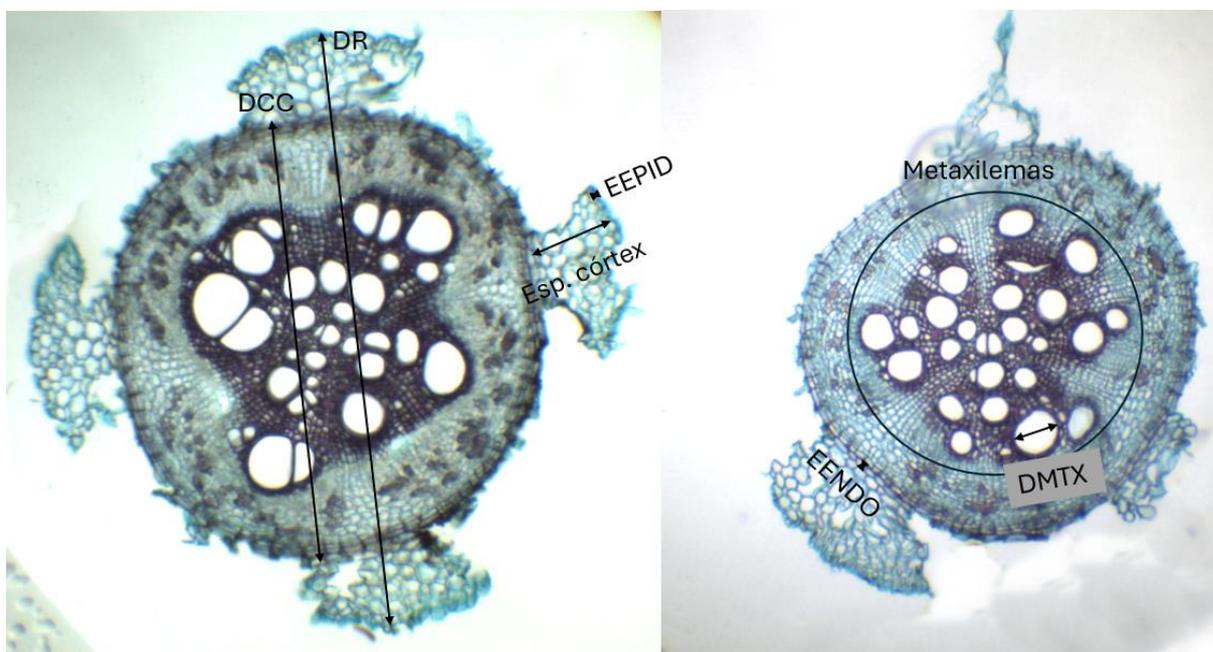


Figura 3. Secção transversal de raiz da soja (*Glycine max* L.): diâmetro da raiz (DR), diâmetro do cilindro central (DCC), número de metaxilemas (Metaxilemas), diâmetro do metaxilema (DMTX), espessura da epiderme (EEPID), endoderme (EENDO) e do parênquima cortical (Esp. Córtex), de segmentos de raízes de plantas de soja. Fonte: arquivo pessoal da autora.

3.3.3 ANÁLISE FOLIAR E DE GRÃOS DOS TEORES NUTRICIONAIS

As coletas de folhas, correspondendo à terceira e quarta à partir do ápice da haste principal, para a determinação de variáveis nutricionais foram realizadas aos 10 e 20 dias de encharcamento e ao final do ciclo também foram coletadas amostras de grãos para realização da análise dos teores de N, P e K, de acordo com a metodologia de Lana et al. (2016), os teores de nitrogênio foram determinados via arraste de gases Kejldahl, os de fósforo via espectrofotometria por colorimetria e o de potássio via fotômetro de chama.

3.3.4 TEORES DOS PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS E TROCAS GASOSAS

As coletas de folhas para a determinação dos pigmentos fotossintéticos foram realizadas aos 10 e 20 dias de encharcamento. Para tanto foram coletadas amostras frescas no pre-dawn, que foram embaladas, identificadas e armazenadas em ultrafreezer a -80 °C. Posteriormente, sob ausência de luz, as amostras foram separadas em $\pm 0,250$ g e processadas com nitrogênio líquido, em seguida, macerado, junto à 10 mL de acetona 80%, com auxílio de almofariz e pistilo. O material macerado foi acondicionado em tubos falcon com capacidade para 15 mL. Imediatamente após a maceração, a solução foi centrifugada a 4000 g durante vinte minutos a 4 °C.

Após a centrifugação o sobrenadante foi recolhido para realizar as leituras em espectrofotômetro, em cubetas de vidro. Durante as leituras também foi realizada a diluição do sobrenadante, portanto, foram utilizados 1 mL do sobrenadante e 1 mL de acetona 80%. Para a determinação dos teores de clorofila a, b e carotenoides, utilizou-se os comprimentos de onda 665, 649 e 480 nm, respectivamente.

Os teores de clorofila e carotenoides foram expressos em mg g^{-1} de matéria fresca, e utilizados para o cálculo de teor total de clorofila, relação clorofila a/b, relação clorofilas totais e carotenoides (BRITO, 2023; LICHTENTHALER, 1987).

As avaliações fisiológicas referentes ao teor relativo de clorofila (índice SPAD) e às medidas pontuais de trocas gasosas foram determinadas aos 10 e 20 dias de encharcamento. Para as medidas do teor relativo de clorofila foi utilizado clorofilômetro portátil SPAD 520 Konica Minolta Plus. Quanto às trocas gasosas, foi utilizado um medidor portátil de trocas gasosas *Infra-Red Gas Analyzer* (IRGA) Li-6400XT. Com fluxo de ar padronizado a $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ por minuto e $400 \mu\text{mol}$ de CO_2 de referência. As avaliações ocorreram no período da manhã entre 9h00min e 11h30min,

sendo avaliadas em folhas completamente desenvolvidas fotossinteticamente ativas e sem lesões, localizadas no terço médio das plantas, que foram identificadas antes da imposição do estresse.

Foi mensurado: A – Taxa de assimilação líquida de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); E – Taxa de transpiração ($\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); g_s – Condutância estomática ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); C_i – Concentração interna de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$). Além das razões: WUE (eficiência no uso da água) = A/E ; $iWUE$ (Eficiência intrínseca no uso da água) = A/g_s ; F_c (Eficiência instantânea de carboxilação) = A/C_i (ZHANG et al., 2001).

3.3.5 VARIÁVEIS DE PRODUÇÃO

Ao final do ciclo foram determinadas a altura de plantas e da inserção da primeira vagem e os componentes da produção: número de vagens por planta, grãos por vagem, grãos por planta, massa de mil grãos (MAPA, 2009) e produção por planta, expresso em gramas (g), após correção para 13% de umidade.

Para o cálculo de massa de mil grãos foi utilizada a seguinte fórmula: Massa de mil grãos (MMG) = peso da amostra * 1000 / n° total de sementes.

3.3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram submetidos à análise de variância a 5% de probabilidade de erro, e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. As análises foram realizadas com auxílio do software Sisvar (FERREIRA, 2011).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 VARIÁVEIS BIOMÉTRICAS

Para as plantas de soja, aos 10 dias de encharcamento, não foi verificada interação significativa entre os fatores em estudo para as variáveis apresentadas na tabela 2. Para massa seca de raízes (MSR), houve efeito significativo pelo teste F ($P \leq 0,05$) em resposta à aplicação dos bioinsumos. Quanto às variáveis altura de plantas (ALT), massa seca de folhas (MSF) e da parte aérea (MSPA), diferenças significativas, pelo teste F ($P \leq 0,05$), foram verificadas apenas para os tratamentos sem e com encharcamento. Não houve efeito significativo para os fatores quanto ao número de folhas (NF) e área foliar (AF).

Tabela 2- Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio da altura de plantas (ALT), diâmetro de caule (DIAM), número de folhas (NF), área foliar (AF), massa seca de folhas (MSF) massa seca de parte aérea (MSPA), massa seca de parte aérea (MSPA) e massa seca de raízes (MSR) de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

FV	GL	ALT	DIAM	NF	AF
Estresse (E)	1	190,12*	4,87 ^{ns}	134,07 ^{ns}	142589,34 ^{ns}
Bioinsumos (B)	3	31,10 ^{ns}	0,08 ^{ns}	7,75 ^{ns}	19144,91 ^{ns}
E x B	3	34,06 ^{ns}	0,14 ^{ns}	4,73 ^{ns}	20399,79 ^{ns}
Bloco	3	20,91	0,90	8,27	337713,73
Resíduo	21	32,59	1,95	32,18	325646,21
CV (%)		7,94	13,17	12,93	18,93
FV	GL	MSF	MSPA	MSR	
Estresse (E)	1	36,69*	117,69*	543,63 ^{ns}	
Bioinsumos (B)	3	0,06 ^{ns}	1,81 ^{ns}	2271,31*	
E x B	3	0,99 ^{ns}	2,78 ^{ns}	200,44 ^{ns}	
Bloco	3	1,27	13,34	811,08	
Resíduo	21	7,12	24,93	452,66	
CV (%)		14,24	18,96	26,26	

^{ns} não significativo; **, * significativo a 1% e a 5% de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

As plantas expostas ao encharcamento apresentaram redução significativa na altura de 6%, ao comparar com plantas sem encharcamento (Tabela 3 e 4). Resultados concordantes foram observados no trabalho de Sathi et al. (2022) onde,

ao avaliarem genótipos de soja para a tolerância ao encharcamento, relatam que as plantas submetidas ao estresse obtiveram reduções na altura variando de 2 a 33%.

Para massa seca de folha e parte aérea, as plantas expostas ao encharcamento apresentaram incrementos significativos de 12 e 15%, respectivamente, ao comparar com as plantas sem encharcamento (Tabela 4). Ainda no trabalho de Sathi et al. (2022) foram encontrados resultados discrepantes em relação à massa seca de parte aérea. Plantas de soja submetidas ao encharcamento apresentaram reduções nas massas variando de 17 a 40%. Assim como, neste estudo, também foi observada redução no número de folhas e área foliar.

Tabela 3- Médias de altura de plantas (ALT), diâmetro de caule (DIAM), número de folhas (NF), área foliar (AF), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

Estresse	ALT	DIAM	NF	AF
	cm	mm	-	cm ²
Não encharcado	74,37 a	10,21	41,84	2947,15
Encharcado	69,50 b	10,99	45,93	3080,66
CV (%)	7,94	13,17	12,93	18,93
DMS	4,19	1,03	4,17	419,58
Bioinsumos				
Controle	69,56	10,63	43,87	3051,21
<i>A. brasilense</i>	71,25	10,49	45,25	3060,62
<i>A. nodosum</i>	72,81	10,73	43,50	2978,09
AZ + AN	74,12	10,56	42,93	2965,71
DMS	7,96	1,95	7,91	201,75

Nota, ^{ns} não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05). Tratamentos: controle =controle; *A. brasilense* = inoculação de sementes com *A. brasilense*; *A. nodosum*= aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*; AZ+AN = inoculação de sementes com *A. brasilense*+ aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*.

A massa seca de raízes, em plantas de soja inoculadas com *A. brasilense*, apresentaram incrementos de 30%, ao comparar com o controle. Além disso, a massa seca de raízes das plantas inoculadas com *A. brasilense* apresentaram incrementos de 44 e 57%, respectivamente, quando comparadas às plantas que receberam a aplicação foliar do extrato de algas (*A. nodosum*), aplicado individualmente ou em conjunto com a inoculação com *A. brasilense* (Tabela 4).

Os incrementos na massa seca do sistema radicular se devem principalmente à promoção de crescimento mediada pelo *A. brasilense*. Em trabalhos que realizaram a inoculação ou a coinoculação de *B. japonicum* e *A. brasilense* foram obtidos incrementos nos componentes radiculares como aumento do comprimento, massa seca, volume, número de ramificações de raízes e incidência de pelos radiculares (MORETTI et al., 2020; RONDINA et al., 2020).

Tabela 4- Médias da massa seca de folha (MSF), raízes (MSR) e parte aérea (MSPA), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

Estresse	MSF	MSR	MSPA
	----- g -----		
Não encharcado	17,66 b	76,88	24,41 b
Encharcado	19,80 a	85,13	28,25 a
CV (%)	14,24	26,26	18,96
DMS	1,96	15,64	3,67
Bioinsumos			
Controle	18,81	80,40 ab	26,11
<i>A. brasilense</i>	18,64	104,79 a	25,82
<i>A. nodosum</i>	18,67	72,35 b	26,93
AZ + AN	18,80	66,49 b	26,46
DMS	3,72	29,66	6,96

Nota, ^{ns} não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Tratamentos: controle = controle; *A. brasilense* = inoculação de sementes com *A. brasilense*; *A. nodosum* = aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*; AZ+AN = inoculação de sementes com *A. brasilense*+ aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*.

Para as plantas, aos 20 dias de encharcamento e o diâmetro de caule (DIAM) apresentaram efeito significativo pelo teste F ($P \leq 0,05$), em resposta aos tratamentos sem e com encharcamento. Quanto ao número de folhas (NF), massa seca de folha (MSF), massa seca de parte aérea (MSPA) e massa seca de raízes (MSR), foi verificada interação significativa entre os fatores em estudo, pelo teste F ($P \leq 0,05$). No entanto, não houve efeito significativo para altura de plantas (ALT) e área foliar (AF) (Tabela 5).

Tabela 5- Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio da altura de plantas (ALT), diâmetro de caule (DIAM), número de folhas (NF), área foliar (AF), massa seca de folhas (MSF) massa seca de parte aérea (MSPA) e massa seca de raízes (MSR) de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

FV	GL	ALT	DIAM	NF	AF
Estresse (E)	1	29,07 ^{ns}	7,82*	136,12*	772068,07 ^{ns}
Bioinsumos (B)	3	30,25 ^{ns}	0,23 ^{ns}	58,39*	69928,12 ^{ns}
E x B	3	10,48 ^{ns}	1,01 ^{ns}	113,47*	535910,76 ^{ns}
Bloco	3	9,92	0,37	29,04	48376,93
Resíduo	21	19,32	0,72	14,26	188729,63
CV (%)		5,13	7,32	7,59	13,94
FV	GL	MSF	MSPA	MSR	
Estresse (E)	1	6,09 ^{ns}	8,44 ^{ns}	7883,44*	
Bioinsumos (B)	3	4,06 ^{ns}	22,10 ^{ns}	406,17 ^{ns}	
E x B	3	16,80*	219,44*	2286,58*	
Bloco	3	2,44	35,65	568,74	
Resíduo	21	4,89	72,12	548,83	
CV (%)		11,28	11,27	25,82	

^{ns} não significativo; **, * significativo a 1% e a 5% de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

Tabela 6- Médias de área foliar (AF), altura de plantas (ALT) e diâmetro de caule (DIAM), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

Estresse	AF	ALT	DIAM
	cm ²	cm	mm
Não encharcado	3272,34	84,78	11,16 b
Encharcado	2961,68	86,68	12,14 a
CV (%)	13,94	5,13	7,32
DMS	319,42	3,23	0,62
Bioinsumos			
Controle	3011,75	84,50	11,78
<i>A. brasilense</i>	3239,47	85,12	11,79
<i>A. nodosum</i>	3107,93	88,62	11,61
AZ + AN	3108,90	84,68	11,42
DMS	605,65	6,13	1,20

Nota, ^{ns} não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Tratamentos: controle = controle; *A. brasilense* = inoculação de sementes com *A. brasilense*; *A. nodosum* = aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*; AZ+AN = inoculação de sementes com *A. brasilense*+ aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*.

Com relação à massa seca de folha e massa seca de parte aérea, as respostas foram semelhantes. Plantas inoculadas com *A. brasilense* e expostas ao encharcamento apresentaram reduções nas massas de 19 e 15% ao comparar com as plantas inoculadas sem encharcamento (Tabela 7 e Tabela 8).

Para o número de folhas as plantas inoculadas com *A. brasilense* e expostas ao encharcamento apresentaram reduções de 23% ao comparar com as plantas inoculadas sem encharcamento. Ainda para esta variável, plantas inoculadas com *A. brasilense* e sem encharcamento apresentaram incrementos de 10; 24 e 22%, respectivamente, ao comparar com o controle, aplicação foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) e a combinação da inoculação de *A. brasilense* e a aplicação foliar de extrato de algas (Tabela 7).

Para condições de solo encharcado, as plantas que receberam a aplicação foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) apresentaram incrementos no número de folhas de 3% ao comparar com o controle. Ainda, na condição de solo encharcado, as plantas que receberam a aplicação foliar do extrato de algas apresentaram incrementos de 18% ao comparar com a combinação da inoculação com *A. brasilense* e a aplicação foliar de extrato de algas (Tabela 7).

Tabela 7- Médias de massa seca de parte aérea (MSPA) e número de folhas (NF), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

Bioinsumos	MSPA (g)		NF	
	Estresse		Estresse	
	Não encharcado	Encharcado	Não encharcado	Encharcado
Controle	74,87 Aa	76,61 Aa	53,12 Aab	50,00 Aab
<i>A. brasilense</i>	82,10 Aa	69,17 Ba	58,75 Aa	45,00 Bab
<i>A. nodosum</i>	71,04 Aa	82,89 Aa	47,25 Ab	51,87 Aa
Az + AN	75,40 Aa	70,63 Aa	48,12 Ab	43,87 Ab
CV (%)	11,27		7,59	
DMS (Estresse)	12,48		5,55	
DMS (Bioinsumos)	16,74		7,44	

As colunas seguidas de letras minúsculas e as linhas seguidas de letras maiúsculas são semelhantes não diferem entre si pelo teste de Tukey com 5% de probabilidade. Tratamentos: controle = controle; *A. brasilense* = inoculação de sementes com *A. brasilense*; *A. nodosum* = aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*; AZ+AN = inoculação de sementes com *A. brasilense*+ aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*.

No trabalho de Garcia et al. (2020) ao avaliarem a tolerância de cinco genótipos de soja ao alagamento por sete dias no estágio V₄, foi observado reduções no acúmulo de biomassa de raiz, porém, em relação à biomassa de parte aérea, os genótipos obtiveram acúmulo semelhante ao controle, exceto para a cultivar BMX Potência que obteve maiores acúmulos de biomassa de parte aérea. O investimento nesse acúmulo foi atribuído pelos autores a um mecanismo de tolerância ao alagamento. Este mecanismo está possivelmente relacionado à exportação para a parte aérea de ácidos orgânicos via xilema, tendo o papel de remover elétrons das raízes hipóxicas (VITOR; SODEK, 2019).

No caso da massa seca de raízes, as plantas expostas ao solo encharcado que receberam a aplicação foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) e as plantas que foram inoculadas com *A. brasilense* e que receberam a aplicação foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) de forma conjunta, apresentaram aumentos da ordem de 119 e 58 %, respectivamente, ao comparar com as plantas submetidas ao tratamento sem encharcamento (Tabela 8). Ainda, para as plantas expostas ao solo encharcado, as que receberam a aplicação foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) apresentaram incrementos de 54 e 56 %, respectivamente, ao comparar com o controle e a inoculação com *A. brasilense* (Tabela 8).

Durante o início do processo de encharcamento, o acúmulo de etileno restringe a atividade do ácido abscísico (ABA), responsável pela deposição de suberina. Este balanço negativo do ABA é essencial para reduzir temporariamente a biossíntese de suberina das paredes celulares, facilitando a formação de aerênquimas e permitindo estímulos de crescimento pela giberelina (GA). Com a elevação das concentrações de GA e etileno, há regulação na formação do número e comprimento das raízes adventícias (KIM et al., 2015; SASIDHARAN; VOESENEK, 2015), aumento na massa de raízes próximas à superfície e incremento no diâmetro das raízes e do cilindro central (DAVANSO-FABRO et al., 1998).

Quanto ao diâmetro de caule, as plantas submetidas ao encharcamento apresentaram incrementos da ordem de 8% ao comparar com as plantas sem encharcamento (Tabela 6). Quando as plantas foram submetidas ao encharcamento verificou-se alguns efeitos de aclimação ao ambiente hipóxico, como a intensa formação de raízes adventícias, aerênquimas, raízes diageotrópicas (raízes superficiais), espessamento do caule para facilitar a entrada de O₂ (GARCIA et al., 2020; KIM et al., 2018), hipertrofia do caule e de rachaduras corticais ou peridérmicas

em decorrência desta hipertrofia (DAVANSO-FABRO et al., 1998; FANTE et al., 2010), contribuindo assim para aumento no diâmetro do caule.

Tabela 8- Médias de massa seca de raízes (MSR) e massa seca de folhas (MSF), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

Bioinsumos	MSR (g)		MSF (g)	
	Estresse		Estresse	
	Não encharcado	Encharcado	Não encharcado	Encharcado
Controle	84,86 Aa	90,30 Ab	19,91 Aa	20,64 Aa
<i>A. brasilense</i>	84,33 Aa	89,02 Ab	22,28 Aa	18,03 Ba
<i>A. nodosum</i>	63,49 Ba	139,34 Aa	18,09 Aa	20,30 Aa
AZ + AN	67,50 Ba	107,09 Aab	19,73 Aa	17,73 Aa
CV (%)	25,82		11,28	
DMS (Estresse)	34,44		3,25	
DMS (Bioinsumos)	46,18		4,36	

As colunas seguidas de letras minúsculas e as linhas seguidas de letras maiúsculas são semelhantes não diferem entre si pelo teste de Tukey com 5% de probabilidade. Tratamentos: controle = controle; *A. brasilense* = inoculação de sementes com *A. brasilense*; *A. nodosum* = aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*; AZ+AN = inoculação de sementes com *A. brasilense*+ aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*.

4.2 VARIÁVEIS ANATÔMICAS

Para as plantas, aos 10 dias de encharcamento, a espessura do córtex (ECORTEX) apresentou efeito significativo para interação entre os fatores em estudo pelo teste F ($P \leq 0,05$). Quanto ao diâmetro de raiz (DR), diâmetro do cilindro central (DCC) e número de metaxilemas (Nmtx), houve efeito significativo pelo teste pelo teste F ($P \leq 0,05$), em reposta à aplicação dos bioinsumos e para os tratamentos sem e com encharcamento. Quanto ao diâmetro do metaxilema (Dmtx), espessura da epiderme (EEPID) e espessura da endoderme (EENDO), não foram observadas diferenças significativas, pelo teste F ($P \leq 0,05$) (Tabela 9).

Tabela 9- Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio do diâmetro de raiz (DR), diâmetro do cilindro central (DCC), número de metaxilemas (Nmtx), diâmetro de metaxilema (Dmtx), espessura da epiderme (EEPID), espessura da endoderme (EENDO) e espessura do córtex (ECORTEX), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

FV	GL	DR	DCC	NMtx	Dmtx
Estresse (E)	1	3093,22 *	2832,78*	770,28*	4,84 ^{ns}
Bioinsumos (B)	3	941,60 *	1033,88*	286,46*	0,55 ^{ns}
E x B	3	29,77 ^{ns}	183,81 ^{ns}	74,53 ^{ns}	0,41 ^{ns}
Bloco	3	92,03	125,31	4,59	1,35
Resíduo	21	275,80	263,84	47,91	1,22
CV (%)		11,69	15,72	23,58	15,12
FV	GL	EEPID	EENDO	ECORTEX	
Estresse (E)	1	0,02 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,22 ^{ns}	
Bioinsumos (B)	3	0,06 ^{ns}	0,04 ^{ns}	67,49 ^{ns}	
E x B	3	0,12 ^{ns}	0,01 ^{ns}	88,14*	
Bloco	3	0,12	0,01	41,37	
Resíduo	21	0,17	0,05	26,14	
CV (%)		21,13	14,32	26,43	

^{ns} não significativo; **, * significativo a 1% e a 5% de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

Plantas de soja encharcadas apresentaram aumentos no DR, DCC e NMtx da ordem de 14; 20 e 40%, respectivamente, ao comparar com as plantas sem encharcamento. Para o diâmetro de raízes, plantas inoculadas com *A. brasilense* apresentaram incrementos de 20%, respectivamente, ao comparar com o controle (Tabela 10).

As plantas com aplicação foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) e a combinação da inoculação e aplicação foliar de extrato de algas apresentaram incrementos no diâmetro do cilindro central de 26 e 28%, respectivamente, em comparação ao controle (Tabela 10). Para as plantas inoculadas com *A. brasilense*, aplicação foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) e a combinação da inoculação e aplicação foliar apresentaram incrementos no número de metaxilemas de 58; 49 e 63%, respectivamente, ao comparar com o tratamento controle (Tabela 10).

Foram encontrados resultados semelhantes nos trabalhos de Mochizuki et al. (2013) e de Valliyodan et al. (2014), onde as plantas submetidas a hipóxia apresentaram aumento no diâmetro médio da raiz. Assim como, no estudo de

Davasno fabro (1998), as plantas de *Sesbania virgata* (Cav.) Pers em ambiente alagado, apresentaram incrementos no diâmetro de elementos dos vasos, apresentando melhor eficiência no transporte de água, em condições de hipoxia. Onde há intensa suberização, lignificação das raízes e restrição na absorção de nutrientes, o aumento no diâmetro se torna útil para melhorar a eficiência do uso e transporte de água.

Tabela 10- Médias do diâmetro de raiz (DR), diâmetro do cilindro central (DCC), número de metaxilemas (Nmtx), diâmetro de metaxilema (Dmtx), espessura da epiderme (EEPID), espessura da endoderme (EENDO), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

Estresse	DR	DCC	Nmtx	Dmtx	EEPID	EENDO
	----- µm -----	-----	-	----- µm -----	-----	-----
Não encharcado	132,17 b	93,89 b	24,45 b	6,92	1,95	1,65
Encharcado	151,83 a	112,71 a	34,26 a	7,69	2,00	1,70
CV (%)	11,69	15,72	23,58	15,12	21,13	14,32
DMS	12,21	11,94	5,08	0,81	0,30	0,17
Bioinsumos						
Controle	127,30 b	86,62 b	20,56 b	6,96	2,08	1,65
<i>A. brasilense</i>	153,30 a	105,73 ab	32,56 a	7,24	1,94	1,78
<i>A. nodosum</i>	145,00 ab	109,49 a	30,71 a	7,43	1,87	1,69
AZ + AN	142,40 ab	111,38 a	33,59 a	7,58	2,09	1,59
DMS	23,15	22,64	9,65	1,54	0,58	0,33

Nota, ^{ns} não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Tratamentos: controle = controle; *A. brasilense* = inoculação de sementes com *A. brasilense*; *A. nodosum* = aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*; AZ+AN = inoculação de sementes com *A. brasilense*+ aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*.

Com relação a espessura do córtex, plantas do tratamento controle e expostas ao encharcamento apresentaram aumentos de 41% ao comparar com plantas sem encharcamento. As plantas expostas ao solo encharcado e que receberam aplicação foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) apresentaram reduções de 37% ao comparar com as mesmas plantas sem encharcamento (Tabela 11). Ainda, as plantas submetidas ao encharcamento, os tratamentos com aplicação foliar de extrato de

algas (*A. nodosum*) e a combinação da inoculação e aplicação foliar apresentaram reduções na espessura do córtex da ordem de 48 e 38% ao comparar com o controle (Tabela 11).

Tabela 11- Médias da espessura do córtex (ECTEX), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

ECTEX (μm)		
Estresse		
Bioinsumos	Não encharcado	Encharcado
Controle	18,81 Ba	26,68 Aa
<i>A. brasilense</i>	20,17 Aa	21,03 Aab
<i>A. nodosum</i>	21,98 Aa	13,64 Bb
AZ + AN	16,08 Aa	16,34 Ab
CV (%)	26,43	
DMS (Estresse)	7,51	
DMS (Bioinsumos)	10,08	

As colunas seguidas de letras minúsculas e as linhas seguidas de letras maiúsculas são semelhantes não diferem entre si pelo teste de Tukey com 5% de probabilidade. Tratamentos: controle = controle; *A. brasilense* = inoculação de sementes com *A. brasilense*; *A. nodosum* = aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*; AZ+AN = inoculação de sementes com *A. brasilense*+ aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*.

Para as plantas, aos 20 dias de encharcamento, o diâmetro de raiz (DR) apresentou efeito significativo para os tratamentos sem e com encharcamento pelo teste F ($P \leq 0,05$). Para o diâmetro do cilindro central (DCC) e diâmetro de metaxilema (Dmtx), houve efeito significativo pelo teste F ($P \leq 0,05$) em resposta a aplicação dos bioinsumos. Para o número de metaxilemas (Nmtx) houve efeito significativo da interação entre os fatores em estudo pelo teste F ($P \leq 0,05$). As variáveis espessura do córtex (ECTEX), espessura da epiderme (EEPID) e espessura da endoderme (EENDO) não foi observado efeito significativo pelo teste F ($P \leq 0,05$) (Tabela 12).

Tabela 12- Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio do diâmetro de raiz (DR), diâmetro do cilindro central (DCC), número de metaxilemas (Nmtx), diâmetro de metaxilema (Dmtx), espessura da epiderme (EEPID), espessura da endoderme (EENDO) e espessura do córtex (ECTEX), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

FV	GL	DR	DCC	NMtx	Dmtx
Estresse (E)	1	842,73*	760,29 ^{ns}	1046,53*	0,80 ^{ns}
Bioinsumos (B)	3	572,91*	789,81*	206,20*	5,51*
E x B	3	428,81 ^{ns}	456,84 ^{ns}	190,89*	0,30 ^{ns}
Bloco	3	80,87	207,10	73,89	1,13
Resíduo	21	171,41	190,70	46,11	0,69
CV (%)		10,57	15,62	24,17	13,55
FV	GL	EEPID	EENDO	ECTEX	
Estresse (E)	1	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}	7,94 ^{ns}	
Bioinsumos (B)	3	0,04 ^{ns}	0,03 ^{ns}	34,99 ^{ns}	
E x B	3	0,03 ^{ns}	0,03 ^{ns}	18,89 ^{ns}	
Bloco	3	0,01	0,00	65,26	
Resíduo	21	0,05	0,05	34,40	
CV (%)		12,91	13,59	31,39	

^{ns} não significativo; **, * significativo a 1% e a 5% de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

As plantas submetidas ao encharcamento apresentaram reduções de 7% no DR, respectivamente, ao comparar com as plantas sem encharcamento. As plantas que receberam aplicação foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) apresentaram reduções de 15% no DR, respectivamente, ao comparar com o controle. Além disso, tanto as plantas inoculadas com *A. brasilense* e as que receberam aplicação foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) apresentaram reduções de 19% no DCC, respectivamente, ao comparar com o controle. Ainda, as plantas de soja inoculadas com *A. brasilense* e a combinação da inoculação e aplicação foliar apresentaram reduções no Dmtx de 19 e 27%, respectivamente, em relação ao controle (Tabela 13).

Tabela 13- Médias do diâmetro de raiz (DR), diâmetro do cilindro central (DCC), diâmetro de metaxilema (Dmtx), espessura da epiderme (EEPID), espessura da endoderme (EENDO) e espessura do córtex (ECTEX), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

Estresse	DR	DCC	Dmtx	ECTEX	EEPID	EENDO
	----- μm -----					
Não encharcado	129,01 a	93,25	6,31	19,18	1,73	1,63
Encharcado	118,75 b	83,50	5,99	18,18	1,78	1,66
CV (%)	10,57	15,62	13,55	31,39	12,91	13,59
DMS	9,62	10,15	0,61	4,31	0,16	0,16
Bioinsumos						
Controle	134,72 a	103,23 a	7,18 a	16,89	1,87	1,65
<i>A. brasilense</i>	122,39 ab	82,95 b	5,79 b	19,87	1,71	1,73
<i>A. nodosum</i>	114,13 b	82,74 b	6,40 ab	16,94	1,75	1,56
AZ + AN	124,27ab	84,59 ab	5,24 b	21,02	1,70	1,63
DMS	18,25	19,25	1,16	8,17	0,31	0,31

Nota, ^{ns} não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Tratamentos: controle = controle; *A. brasilense* = inoculação de sementes com *A. brasilense*; *A. nodosum* = aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*; AZ+AN = inoculação de sementes com *A. brasilense*+ aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*.

As plantas submetidas ao encharcamento que receberam aplicação foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) ou a combinação da inoculação e aplicação foliar, apresentaram reduções no Nmtx de 39 e 59% ao comparar com as plantas sem encharcamento. Além disso, entre as plantas expostas ao encharcamento, aquelas que receberam aplicação foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) apresentaram uma redução de 45% ao comparar com o controle (Tabela 14).

Nas plantas sem encharcamento, a combinação da inoculação e aplicação foliar, apresentou incremento no Nmtx de 10; 48 e 54%, respectivamente, ao comparar com o controle, inoculação com *A. brasilense* e a aplicação foliar de extrato de algas (*A. nodosum*). Ainda, as plantas que receberam a inoculação de *A. brasilense* ou a aplicação foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) apresentaram reduções da ordem de 25 e 28% ao comparar com o controle (Tabela 14).

Tabela 14- Média do número de metaxilemas (Nmtx), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

Nmtx		
Estresse		
Bioinsumos	Não encharcado	Encharcado
Controle	38,06 Aab	29,75 Aa
<i>A. brasilense</i>	28,18 Ab	26,43 Aab
<i>A. nodosum</i>	27,06 Ab	16,31 Bb
AZ + AN	41,93 Aa	17,00 Bab
CV (%)	24,17	
DMS (Estresse)	9,98	
DMS (Bioinsumos)	13,38	

As colunas seguidas de letras minúsculas e as linhas seguidas de letras maiúsculas são semelhantes não diferem entre si pelo teste de Tukey com 5% de probabilidade. Tratamentos: controle =controle; *A. brasilense* = inoculação de sementes com *A. brasilense*; *A. nodosum*= aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*; AZ+AN = inoculação de sementes com *A. brasilense*+ aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*.

O etileno desempenha um papel como sinalizador na resposta ao estresse, regulando o desenvolvimento radicular e facilitando o transporte de auxina e giberelina nas zonas de enraizamento. Esse processo favorece o desenvolvimento radicular adventício ou mesmo de raízes rasas próximas a superfície (NGUYEN et al., 2018; YAMAUCHI et al., 2018; ZHANG et al., 2021). Além disso, o etileno induz a formação de aerênquima, que auxilia na respiração aeróbica e pode contribuir para a manutenção do crescimento radicular (ZAHRA et al., 2021).

Bacanamwo; Purcell, (1999a, 1999b) sugerem que as adaptações morfológicas observadas em seu estudo, como o aumento da porosidade da raiz, devido à formação de aerênquimas e raízes adventícias, foram responsáveis pela recuperação da fixação de N₂, da taxa de biomassa e do acúmulo de N retornarem aos níveis de controle entre os dias 14 e 21 de alagamento. Assim como, as plantas que foram impedidas de desenvolver aerênquimas, devido a adição de prata na solução nutritiva, aumentaram sua sensibilidade ao encharcamento, evidenciando que o desenvolvimento do aerênquima é importante para a aclimação e pode estar relacionada a tolerância ao alagamento das leguminosas (MOCHIZUKI et al., 2013; VALLIYODAN et al., 2014).

Thomas; Guerreiro; Sodek, (2005) também observaram um comportamento semelhante em seu estudo, onde as plantas de soja submetidas ao encharcamento desenvolveram aerênquimas esquizogênico e lisígeno, ambos de natureza cortical. O aerênquima esquizogênico se forma por separação e expansão de células maduras, enquanto o aerênquima lisígeno surge pela morte e dissolução das células (THOMAS; GUERREIRO; SODEK, 2005; YAMAUCHI et al., 2018). Estes aerênquimas foram responsáveis pelo deslocamento radial da endoderme e córtex, levando à ruptura e desprendimento da epiderme, resultando em uma quantidade reduzida do córtex. Da mesma forma, Davanso-Fabro et al. (1998) observaram que plantas de *Sebania virgata* (Cav.) Pers., submetidas a 40 dias de alagamento, apresentaram raízes superficiais e adventícias, além de rachaduras corticais e intumescimento cortical esponjoso em caules e raízes.

No presente estudo, como mostrado na figura 4, as imagens A e C representam plantas sem encharcamento, enquanto as imagens B e D mostram plantas sob encharcamento. Observa-se que, nas figuras B e D, há um maior volume de raízes próximas à superfície. Na figura E, apesar de não ter sido possível avaliar os aerênquimas devido aos cortes incompletos do córtex, verificou-se a presença dessas estruturas nas plantas sob encharcamento. Além disso, na figura F, foi possível observar o aspecto esponjoso das raízes.

No estudo de Davanso-Fabro et al. (1998), foi observado que não houve diferença significativa na espessura do cilindro central da raiz, porém, as plantas submetidas ao alagamento apresentaram maior espessura do córtex, resultando em maior espessura da raiz. Além disso, foi observado aumento na massa seca de raízes em comparação ao controle, provavelmente devido à maior ramificação e formação de raízes adventícias em plantas adaptadas à inundação.

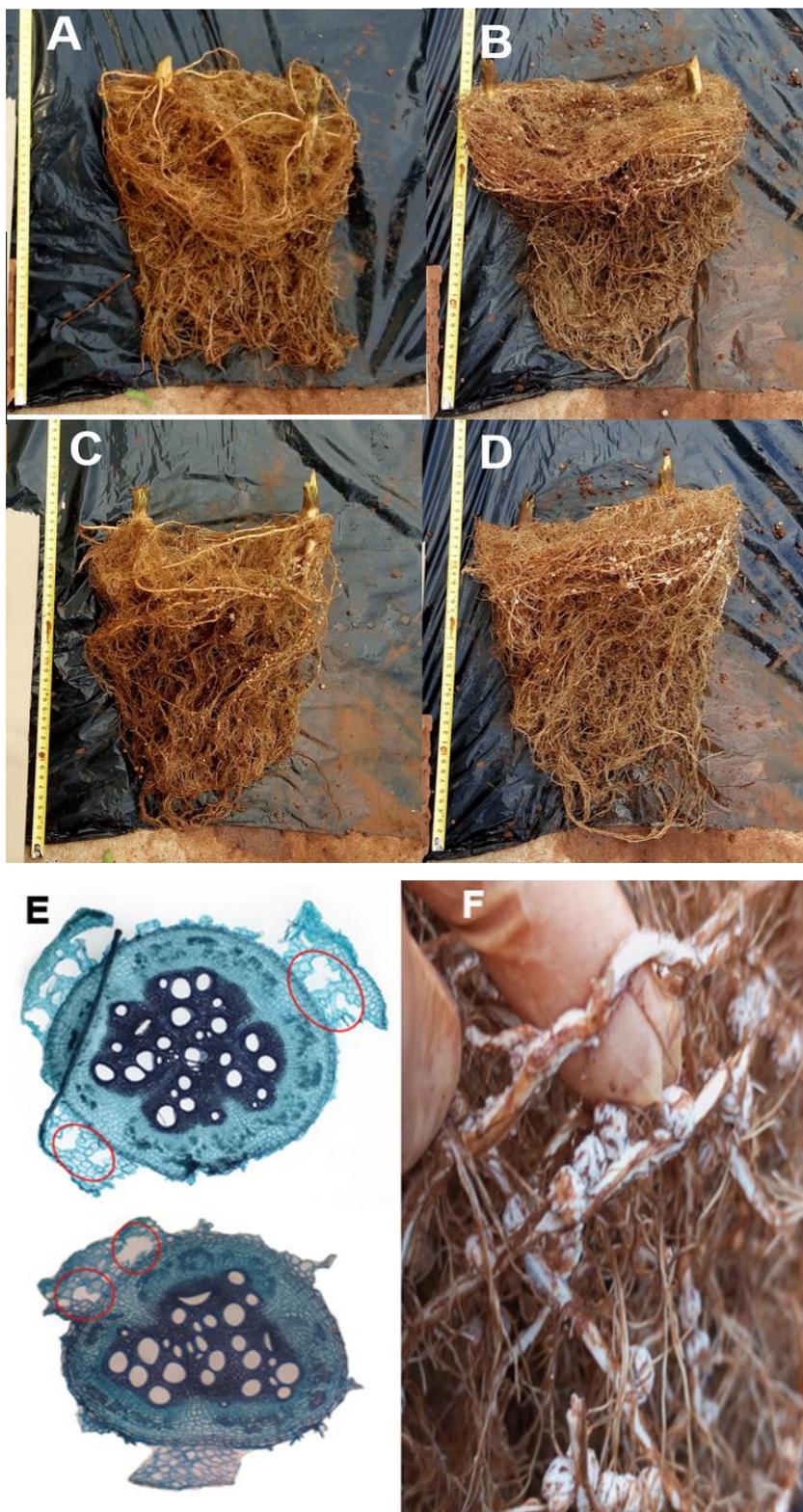


Figura 4. Raízes de plantas durante as coletas para avaliação biométrica e anatômica, 10 e 20 dias após a imposição do encharcamento. Raízes (A) e (C) plantas sem encharcamento; raízes (B) e (D) com encharcamento; aerênquimas (E) e aspecto esponjoso (F). Fonte: Raízes de plantas durante as coletas para avaliação biométrica e anatômica, 10 e 20 dias após a imposição do encharcamento. Raízes (A) e (C) plantas sem encharcamento; raízes (B) e (D) com encharcamento; aerênquimas (E) e aspecto esponjoso (F). Fonte: arquivo pessoal da autora.

4.3 ANÁLISE FOLIAR E DE GRÃOS DOS TEORES NUTRICIONAIS

Aos 10 dias de encharcamento, os teores de nitrogênio (N) e fósforo (P) apresentaram efeito significativo pelo teste F ($P \leq 0,05$), em resposta aos tratamentos sem e com encharcamento. Para o teor de potássio (K) não houve efeito significativo pelo teste F ($P \leq 0,05$) (Tabela 15).

Tabela 15- Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio dos teores foliares de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

FV	GL	N	P	K
Estresse (E)	1	1089,26 *	1,52*	66,75 ^{ns}
Bioinsumos (B)	3	24,06 ^{ns}	0,05 ^{ns}	2,76 ^{ns}
E x B	3	4,10 ^{ns}	0,04 ^{ns}	20,68 ^{ns}
Bloco	3	12,71	0,27	50,44
Resíduo	21	18,92	0,05	17,15
CV (%)		10,44	13,02	15,80

^{ns} não significativo; **, * significativo a 1% e a 5% de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

As plantas submetidas ao encharcamento de 10 dias apresentaram redução nos teores de nitrogênio (N) e fósforo (P) da ordem de 24 e 21%, respectivamente, ao comparar com as conduzidas sem encharcamento (Tabela 16).

Tabela 16- Médias dos teores foliares de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

Estresse	N	P	K
	----- g kg ⁻¹ -----		
Não encharcado	47,51 a	2,05 a	27,66
Encharcado	35,84 b	1,61 b	24,76
CV (%)	10,44	13,02	15,80
DMS	3,20	0,17	3,04
Bioinsumos			
Controle	44,16	1,91	25,93
<i>A. brasilense</i>	40,67	1,80	25,58
<i>A. nodosum</i>	41,55	1,89	26,40
AZ + AN	40,34	1,73	26,93
DMS	6,06	0,33	5,77

Nota, ^{ns} não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Tratamentos: controle = controle; *A. brasilense* = inoculação de sementes com *A. brasilense*; *A. nodosum* = aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*; AZ+AN = inoculação de sementes com *A. brasilense*+ aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*.

Aos 20 dias de encharcamento, os teores de fósforo (P), apresentaram efeito significativo pelo teste F ($P \leq 0,05$), em resposta aos bioinsumos e aos tratamentos sem e com encharcamento. Para o teor de nitrogênio (N), foi verificado efeito significativo pelo teste F ($P \leq 0,05$) para a interação entre os fatores em estudo. Quanto ao teor de potássio (K) não houve efeito significativo (Tabela 17).

Tabela 17- Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio dos teores foliares de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

FV	GL	N	P	K
Estresse (E)	1	336,74*	1,04*	10,26 ^{ns}
Bioinsumos (B)	3	10,81 ^{ns}	0,11*	2,03 ^{ns}
E x B	3	44,13*	0,01 ^{ns}	0,14 ^{ns}
Bloco	3	28,44	0,04	2,02
Resíduo	21	8,90	0,02	5,67
CV (%)		8,84	9,36	10,06

^{ns} não significativo; **, * significativo a 1% e a 5% de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

As plantas submetidas ao encharcamento por 20 dias apresentaram redução de 21% nos teores fósforo (P), respectivamente, ao comparar com as conduzidas sem encharcamento (Tabela 18). As plantas que receberam a aplicação foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) apresentaram incrementos de 15; 15 e 18%, respectivamente, nos teores de fósforo ao comparar com o controle, inoculação com *A. brasilense* e a combinação da inoculação com *A. brasilense* e a aplicação foliar de extrato de algas (Tabela 18).

Tabela 18- Médias dos teores foliares de fósforo (P) e potássio (K), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

Estresse	P	K
	----- g kg ⁻¹ -----	
Não encharcado	1,75 a	24,26
Encharcado	1,38 b	23,12
CV (%)	9,36	10,06
DMS	0,10	1,75
Bioinsumos		
Controle	1,51 b	24,14
<i>A. brasilense</i>	1,52 b	23,83
<i>A. nodosum</i>	1,75 a	23,83
AZ + AN	1,48 b	22,97
DMS	0,20	3,32

Nota, ^{ns} não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05). Tratamentos: controle =controle; *A. brasilense* = inoculação de sementes com *A. brasilense*; *A. nodosum*= aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*; AZ+AN = inoculação de sementes com *A. brasilense*+ aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*.

Com relação ao teor de nitrogênio, as plantas submetidas encharcamento e inoculadas com *A. brasilense*, aplicação foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) e a combinação da inoculação e aplicação foliar, apresentaram reduções de 24; 16 e 26%, respectivamente, ao comparar com as plantas sem encharcamento (Tabela 19).

Ao analisar os bioinsumos nas plantas encharcadas, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos. Por outro lado, nas plantas conduzidas sem encharcamento, a combinação da inoculação de *A. brasilense* e aplicação foliar

de extrato de algas (*A. nodosum*) resultou em um incremento de 21% ao comparar com o controle (Tabela 19).

Tabela 19- Média dos teores foliares de nitrogênio de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

N (g kg ⁻¹)		
Estresse		
Bioinsumos	Não encharcado	Encharcado
Controle	32,53 Ab	32,60 Aa
<i>A. brasilense</i>	37,71 Aab	28,54 Ba
<i>A. nodosum</i>	38,35 Aab	31,98 Ba
AZ + AN	39,50 Aa	29,02 Ba
CV (%)	8,84	
DMS (Estresse)	4,38	
DMS (Bioinsumos)	5,88	

As colunas seguidas de letras minúsculas e as linhas seguidas de letras maiúsculas são semelhantes não diferem entre si pelo teste de Tukey com 5% de probabilidade. Tratamentos: controle = controle; *A. brasilense* = inoculação de sementes com *A. brasilense*; *A. nodosum* = aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*; AZ+AN = inoculação de sementes com *A. brasilense*+ aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*.

Para os teores nutricionais nos grãos, os teores de fósforo (P) e potássio (K) apresentaram efeito significativo pelo teste F ($P \leq 0,05$), em resposta aos tratamentos sem e com encharcamento. Para o teor de nitrogênio (N) não houve efeito significativo (Tabela 20).

Tabela 20- Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio dos teores de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) de grão, de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

FV	GL	N	P	K
Estresse (E)	1	18,77 ^{ns}	2,41*	14,46*
Bioinsumos (B)	3	25,53 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,59 ^{ns}
E x B	3	7,25 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,74 ^{ns}
Bloco	3	9,32	0,44	0,24
Resíduo	21	11,13	0,12	1,29
CV (%)		5,34	9,53	4,70

^{ns} não significativo; **, * significativo a 1% e a 5% de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

Em relação aos teores nutricionais nos grãos, as plantas submetidas ao encharcamento apresentaram reduções nos teores de fósforo e potássio, correspondendo a 13 e 5%, respectivamente, ao comparar com as sem encharcamento (Tabela 21).

Tabela 21- Médias dos teores de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) de grão, de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

Estresse	N	P	K
	----- g kg ⁻¹ -----		
Não encharcado	63,30	3,98 a	24,86 a
Encharcado	61,77	3,43 b	23,52 b
CV (%)	5,34	9,53	4,70
DMS	2,45	0,26	0,82
Bioinsumos			
Controle	61,43	3,86	24,13
<i>A. brasilense</i>	60,90	3,78	24,50
<i>A. nodosum</i>	64,88	3,64	23,85
AZ + AN	62,93	3,52	24,27
DMS	4,65	0,49	1,58

Nota, ^{ns} não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05). Tratamentos: controle = controle; *A. brasilense* = inoculação de sementes com *A. brasilense*; *A. nodosum* = aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*; AZ+AN = inoculação de sementes com *A. brasilense*+ aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*.

Segundo o manual de adubação e calagem para o estado do Paraná (PAULETTI; MOTTA, 2019), aos 10 dias de encharcamento, as plantas submetidas ao estresse apresentaram deficiência de N e P. Aos 20 dias após a imposição do encharcamento, tanto as plantas não submetidas ao encharcamento e as submetidas apresentaram deficiência nos teores de N e P.

Com relação aos teores nutricionais, aos 10 e 20 dias de encharcamento e de grãos, a redução nos teores das plantas submetidas ao encharcamento se deve, principalmente, à limitação na absorção de nutrientes causada pela diminuição da permeabilidade da membrana (FATIMAH; NURHIDAYATI, 2020; KHAN et al., 2020; SOUSA; SODEK, 2002). Esse processo resulta em sintomas de deficiência e até em redução dos teores destes nutrientes na parte aérea, afetando a altura e o acúmulo

de massa seca (ADEGOYE et al., 2023; CECATTO JÚNIOR et al., 2022; SATHI et al., 2022).

Quanto ao teor de N, a deficiência de oxigênio suprime a fixação biológica de nitrogênio pelos nódulos devido à redução da atividade nitrogenase. No entanto esses efeitos são reversíveis após o reestabelecimento da drenagem (SOUZA; MAZZAFERA; SODEK, 2016). Comportamento semelhante foi observado no presente estudo. Sob condições de solo encharcado, as plantas apresentaram menores teores de N nas folhas. Porém, o teor de N nos grãos não diferiu significativamente em função do encharcamento, pois assim que a drenagem foi reestabelecida, provavelmente houve ativação da nitrogenase retomando a fixação biológica de nitrogênio. Além disso, a melhora na oxigenação das raízes pela drenagem pode ter facilitado a retomada da atividade fotossintética, transpiração, restaurando o fluxo de massa e a absorção de nutrientes, sendo assim, a planta pode recuperar sua capacidade de absorver água e nutrientes de forma eficiente novamente (GARCIA et al., 2020; MIGNOLLI et al., 2024; SHAO et al., 2013; SMETHURST; GARNETT; SHABALA, 2005; TAIZ et al., 2017).

Além disso, com a restauração da drenagem, retomada de absorção de nutrientes e fotossíntese, inicia-se o processo de remobilização e partição dos nutrientes previamente acumulados nas folhas e caules para os grãos. Segundo Bender, Haegele e Below (2015), mais da metade do N e P presentes nos grãos tem origem no acúmulo desses nutrientes durante o enchimento, enquanto o restante provém da remobilização, principalmente das folhas. No caso do K, sua remobilização ocorre predominantemente a partir do caule, garantindo o suprimento necessário para o desenvolvimento dos grãos.

Resultados semelhantes foram encontrados no estudo de Cecatto Júnior et al. (2022), que avaliaram plantas de soja submetidas ao encharcamento e constatou reduções nos teores foliares de nitrogênio, fósforo, potássio de 43; 32 e 22%. No estudo de Adegoye et al. (2023), ao avaliarem os efeitos do encharcamento na soja em estágio reprodutivo, também foram observadas reduções nos teores foliares de N, Mg e Ca, na ordem de 16%, 25% e 2%, respectivamente, em comparação com o controle.

4.4 TEORES DOS PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS E TROCAS GASOSAS

Aos 10 dias de encharcamento, o índice SPAD, teores de clorofila a, b e total, e carotenoides, apresentaram efeito significativo pelo teste F ($P \leq 0,05$) em resposta aos tratamentos sem e com encharcamento. No entanto, a relação de clorofila a/b não houve efeito significativo (Tabela 22).

Tabela 22. Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio do índice SPAD, teor de clorofila a (Chl a), teor de clorofila b (Chl b), teor total de clorofila (a+b), relação de clorofila a/b e teor de carotenoides (Car), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

FV	GL	SPAD	Chl a	Chl b	a+b	a/b	Car
Estresse (E)	1	93,84*	0,38 *	0,15 *	0,83 *	0,04 ^{ns}	0,03 *
Bioinsumos (B)	3	1,00 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,00 ^{ns}
E x B	3	0,84 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,00 ^{ns}
Bloco	3	2,03	0,26	0,08	0,53	0,01	0,02
Resíduo	21	8,13	0,06	0,02	0,12	0,02	0,00
CV (%)		6,65	21,39	23,45	21,87	6,75	18,23

^{ns} não significativo; **, * significativo a 1% e a 5% de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

As plantas submetidas ao encharcamento de 10 dias apresentaram redução no índice SPAD, teor de clorofila a (Chl a), b (Chl b), teor total de clorofila (a+b) e carotenoides (Car), correspondendo a 7; 17; 21; 18 e 15%, respectivamente, ao comparar com as plantas sem encharcamento (Tabela 23).

Tabela 23. Médias do teor de clorofila *a* (Chl *a*), teor de clorofila *b* (Chl *b*), teor total de clorofila (*a*+*b*), relação de clorofila *a*/*b* e teor de carotenoides (Car), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

Estresse	SPAD	Chl <i>a</i>	Chl <i>b</i>	<i>a</i> + <i>b</i>	<i>a</i> / <i>b</i>	Car
	----- mg g ⁻¹ MF -----					
Não encharcado	44,61 a	1,23 a	0,66 a	1,72 a	1,89	0,33 a
Encharcado	41,19 b	1,01 b	0,52 b	1,40 b	1,96	0,28 b
CV (%)	6,65	21,39	23,45	21,87	6,75	18,23
DMS	2,09	0,18	0,10	0,25	0,10	0,04
Bioinsumos						
Controle	42,46	0,93	0,50	1,30	1,88	0,27
<i>A. brasilense</i>	43,01	1,14	0,60	1,58	1,91	0,31
<i>A. nodosum</i>	43,31	1,21	0,61	1,66	1,97	0,32
AZ + AN	43,83	1,22	0,64	0,17	1,94	0,33
DMS	3,97	0,34	0,19	0,47	0,18	0,08

Nota, ^{ns} não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Tratamentos: controle = controle; *A. brasilense* = inoculação de sementes com *A. brasilense*; *A. nodosum* = aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*; AZ+AN = inoculação de sementes com *A. brasilense*+ aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*.

Aos 20 dias de encharcamento, o índice SPAD, teores de clorofila *a*, *b* e total, e carotenoides, apresentaram efeito significativo pelo teste F ($P \leq 0,05$) em resposta aos tratamentos sem e com encharcamento. No entanto, a relação de clorofila *a*/*b* não houve efeito significativo (Tabela 24).

Tabela 24. Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio do índice SPAD, teor de clorofila a (Chl a), teor de clorofila b (Chl b), teor total de clorofila (a+b), relação de clorofila a/b e teor de carotenoides (Car), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

FV	GL	SPAD	Chl a	Chl b	a+b	a/b	Car
Estresse (E)	1	65,26*	0,37 *	0,14 *	0,80 *	0,03 ^{ns}	0,02 *
Bioinsumos (B)	3	1,33 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,01 ^{ns}
E x B	3	17,12 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}
Bloco	3	2,36	0,08	0,03	0,18	0,02	0,01
Resíduo	21	8,18	0,08	0,03	0,17	0,01	0,00
CV (%)		7,11	27,08	32,52	28,85	4,82	22,81

^{ns} não significativo; **, * significativo a 1% e a 5% de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

As plantas submetidas ao encharcamento de 20 dias apresentaram redução no índice SPAD, teor de clorofila a (Chl a), b (Chl b), teor total de clorofila (a+b) e carotenoides (Car), correspondendo a 6; 18; 27; 19 e 16%, respectivamente, ao comparar com as plantas sem encharcamento (Tabela 25).

Resultados concordantes foram observados no trabalho de Sathi et al. (2022), onde, ao avaliarem genótipos de soja para a tolerância ao encharcamento, relatam que as plantas submetidas ao estresse obtiveram reduções no índice SPAD variando de 13 a 22%. E nos estudos de Cecatto Júnior et al. (2022, 2024), ao avaliarem os efeitos do encharcamento em soja no estágio reprodutivo, foram observadas reduções no índice de clorofila entre 12 e 14% após 15 e 20 dias sob encharcamento, respectivamente.

Quanto aos teores dos pigmentos fotossintéticos, foram observados resultados semelhantes no estudo de Velasco et al. (2019) que, ao avaliarem cinco cultivares de feijão sob hipóxia por um período de 14 dias, observou reduções nos teores de clorofila a, b, total e carotenoides de 24; 13; 33 e 26% respectivamente. E no estudo de Garcia et al. (2020), também foi observada a redução nos teores de clorofila a, b e carotenoides em soja exposta ao alagamento.

Tabela 25. Médias do índice SPAD, teor de clorofila *a* (Chl *a*), teor de clorofila *b* (Chl *b*), teor total de clorofila (*a+b*), relação de clorofila *a/b* e teor de carotenoides (Car), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

Estresse	SPAD	Chl <i>a</i>	Chl <i>b</i>	<i>a+b</i>	<i>a/b</i>	Car
	----- mg g ⁻¹ MF -----					
Não encharcado	41,65 a	1,16 a	0,59 a	1,59 a	1,98	0,30 a
Encharcado	38,80 b	0,94 b	0,43 b	1,28 b	2,04	0,25 b
CV (%)	7,11	27,08	32,52	28,85	4,82	22,81
DMS	2,10	0,21	0,13	0,30	0,07	0,05
Bioinsumos						
Controle	39,71	0,85	0,43	1,16	2,02	0,23
<i>A. brasilense</i>	40,43	1,01	0,52	1,40	1,99	0,26
<i>A. nodosum</i>	40,65	1,16	0,58	1,58	2,02	0,30
AZ + AN	40,11	1,17	0,59	1,60	2,00	0,30
DMS	3,98	0,40	0,24	0,58	0,14	0,09

Nota, ^{ns} não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Tratamentos: controle = controle; *A. brasilense* = inoculação de sementes com *A. brasilense*; *A. nodosum* = aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*; AZ+AN = inoculação de sementes com *A. brasilense*+ aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*.

Aos 10 dias de encharcamento, as variáveis taxa de assimilação líquida de CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)(*A*), taxa de transpiração ($\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)(*E*), condutância estomática ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)(*gs*), concentração interna de CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$) (*Ci*), eficiência no uso da água (*A/E*), eficiência intrínseca no uso da água (*A/gs*) e eficiência instantânea de carboxilação (*A/Ci*), apresentaram efeito significativo pelo teste F ($P \leq 0,05$) em resposta aos tratamentos sem e com encharcamento. No entanto, para a taxa de transpiração ($\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)(*E*), não houve efeito significativo (Tabela 26).

Tabela 26- Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio da taxa de assimilação líquida de CO₂ (*A*), taxa de transpiração (*E*), condutância estomática (*gs*), concentração interna de CO₂ (*C_i*), eficiência no uso da água (*A/E*), eficiência intrínseca no uso da água (*A/g_s*) e eficiência instantânea de carboxilação (*A/C_i*), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

FV	GL	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>gs</i>	<i>C_i</i>
Estresse (E)	1	869,91*	2,26 ^{ns}	0,12*	24740,02*
Bioinsumos (B)	3	6,71 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,00 ^{ns}	236,61 ^{ns}
E x B	3	15,51 ^{ns}	0,93 ^{ns}	0,00 ^{ns}	508,79 ^{ns}
Bloco	3	19,95	4,41	0,02	407,47
Resíduo	21	8,39	1,03	0,00	195,27
CV (%)		37,56	21,03	25,77	6,08
FV	GL	<i>A/E</i>	<i>A/g_s</i>	<i>A/C_i</i>	
Estresse (E)	1	37,98*	5380,61*	0,02*	
Bioinsumos (B)	3	0,36 ^{ns}	57,17 ^{ns}	0,00 ^{ns}	
E x B	3	0,97 ^{ns}	116,35 ^{ns}	0,00 ^{ns}	
Bloco	3	1,52	114,94	0,00	
Resíduo	21	0,65	55,47	0,00	
CV (%)		50,15	32,87	41,38	

^{ns} não significativo; **, * significativo a 1% e a 5% de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

As plantas submetidas ao encharcamento de 10 dias apresentaram redução na taxa de assimilação líquida de CO₂ (*A*), condutância estomática (*gs*), eficiência instantânea de carboxilação (*A/C_i*), eficiência intrínseca no uso da água (*A/g_s*) e eficiência no uso da água (*A/E*), correspondendo a 80; 35; 83; 72 e 80%, respectivamente, ao comparar com as plantas sem encharcamento. Além disso, houve aumento de 27% na concentração interna de CO₂ (*C_i*) (Tabela 27).

A redução da abertura estomática limita a difusão de CO₂ dos estômatos para as folhas, confirmando a diminuição da taxa de assimilação de CO₂ (*A*) e da condutância estomática (*gs*). No entanto, além dessa limitação estomática, outro fator pode estar contribuindo para a redução de *A*. O aumento da concentração interna de CO₂ (*C_i*), pode indicar que algum fator pode estar comprometendo o ciclo de Calvin, possivelmente causado pela baixa atividade da rubisco devido à queda no teor de nitrogênio, deficiência de fósforo comprometendo ATP e NADPH ou estresse oxidativo causado pela produção de radicais livres. Como resultado, apesar da presença de CO₂ no mesofilo das células, sua fixação e assimilação não ocorrem de forma

eficiente, reduzindo a taxa fotossintética ou a eficiência de carboxilação (BULEGON et al., 2019a; CAPITULINO et al., 2017; CECATTO JÚNIOR et al., 2024; PEREIRA et al., 2020; TAIZ et al., 2017).

Tabela 27- Médias da taxa de assimilação líquida de CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)(A), taxa de transpiração ($\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)(E), condutância estomática ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)(gs), concentração interna de CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$) (Ci), eficiência no uso da água (A/E), eficiência intrínseca no uso da água (A/gS) e eficiência instantânea de carboxilação (A/Ci), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 10 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

Estresse	A	E	gs	Ci	A/E	A/GS	A/Ci
Não encharcado	12,93 a	5,09	0,37 a	202,00 b	2,70 a	35,63 a	0,06 a
Encharcado	2,50 b	4,56	0,24 b	257,61 a	0,52 b	9,69 b	0,01 b
CV (%)	37,56	21,03	25,77	6,08	50,15	32,87	41,38
DMS	2,13	0,74	0,06	10,27	0,59	5,47	0,01
Bioinsumos							
Controle	6,73	4,81	0,30	236,33	1,38	19,46	0,03
<i>A. brasilense</i>	8,29	4,74	0,32	229,47	1,88	22,23	0,04
<i>A. nodosum</i>	7,16	4,96	0,31	230,39	1,50	22,97	0,03
AZ + AN	8,67	4,79	0,29	223,04	1,66	25,97	0,04
DMS	4,04	1,41	0,11	19,48	1,12	10,38	0,02

Nota, ^{ns} não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Tratamentos: controle = controle; *A. brasilense* = inoculação de sementes com *A. brasilense*; *A. nodosum* = aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*; AZ+AN = inoculação de sementes com *A. brasilense*+ aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*.

Aos 20 dias de encharcamento, a taxa de assimilação líquida de CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)(A), condutância estomática ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)(gs), concentração interna de CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$) (Ci) e a eficiência intrínseca no uso da água (A/gS), apresentaram efeito significativo pelo teste F ($P \leq 0,05$) em resposta aos tratamentos sem e com encharcamento. Quanto as variáveis taxa de transpiração ($\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)(E), eficiência no uso da água (A/E) e eficiência instantânea de carboxilação (A/Ci), não houve efeito significativo (Tabela 28).

Tabela 28- Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio da taxa de assimilação líquida de CO₂ (*A*), taxa de transpiração (*E*), condutância estomática (*gs*), concentração interna de CO₂ (*Ci*), eficiência no uso da água (*A/E*), eficiência intrínseca no uso da água (*A/g_s*) e eficiência instantânea de carboxilação (*A/Ci*), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

FV	GL	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>gs</i>	<i>Ci</i>
Estresse (E)	1	46,19*	2,10 ^{ns}	0,15*	9249,59*
Bioinsumos (B)	3	3,26 ^{ns}	0,69 ^{ns}	0,00 ^{ns}	103,28 ^{ns}
E x B	3	12,42 ^{ns}	2,00 ^{ns}	0,01 ^{ns}	1051,99 ^{ns}
Bloco	3	3,90	0,32	0,00	493,12
Resíduo	21	5,58	0,70	0,00	537,81
CV (%)		21,73	26,26	34,66	13,33
FV	GL	<i>A/E</i>	<i>A/g_s</i>	<i>A/Ci</i>	
Estresse (E)	1	0,07 ^{ns}	4010,65*	0,00 ^{ns}	
Bioinsumos (B)	3	0,15 ^{ns}	64,18 ^{ns}	0,00 ^{ns}	
E x B	3	0,34 ^{ns}	479,73 ^{ns}	0,00 ^{ns}	
Bloco	3	0,43	147,41	0,00	
Resíduo	21	0,24	194,39	0,00	
CV (%)		14,22	25,98	27,18	

^{ns} não significativo; **, * significativo a 1% e a 5% de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

As plantas submetidas ao encharcamento de 20 dias apresentaram redução na taxa de assimilação líquida de CO₂ (*A*), condutância estomática (*gs*) e concentração interna de CO₂ (*Ci*), correspondendo a 19; 46; 17%, respectivamente, ao comparar com as plantas sem encharcamento. Para a eficiência intrínseca no uso da água (*A/g_s*) as plantas sob solo encharcado apresentaram aumentos na ordem de 52% ao comparar com as plantas sem encharcamento (Tabela 29).

Tabela 29- Médias da taxa de assimilação líquida de CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)(A), taxa de transpiração ($\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)(E), condutância estomática ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)(gs), concentração interna de CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$) (Ci), eficiência no uso da água (A/E), eficiência intrínseca no uso da água (A/g_s) e eficiência instantânea de carboxilação (A/Ci), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos, realizada aos 20 dias de encharcamento. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

Estresse	A	E	gs	Ci	A/E	A/GS	A/CI
Não encharcado	12,08 a	3,45	0,30 a	191,03 a	3,52	42,46 b	0,06
Encharcado	9,67 b	2,94	0,16 b	157,03 b	3,43	64,85 a	0,06
CV (%)	21,73	26,26	34,66	13,33	14,22	25,98	27,18
DMS	1,74	0,61	0,06	17,05	0,36	10,25	0,01
Bioinsumos							
Controle	10,65	3,06	0,22	172,24	3,51	54,84	0,06
<i>A. brasilense</i>	10,27	2,85	0,23	171,67	3,65	56,26	0,06
<i>A. nodosum</i>	11,77	3,51	0,25	179,37	3,37	49,67	0,06
AZ + AN	10,80	3,35	0,22	172,83	3,36	53,84	0,06
DMS	3,29	1,17	0,11	32,33	0,68	19,43	0,02

Nota, ^{ns} não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Tratamentos: controle = controle; *A. brasilense* = inoculação de sementes com *A. brasilense*; *A. nodosum* = aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*; AZ+AN = inoculação de sementes com *A. brasilense*+ aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*.

Quanto às trocas gasosas, resultados semelhantes foram observados no estudo de Cecatto Júnior et al. (2022), onde plantas de soja em ambiente encharcado apresentaram reduções de 40% na taxa de assimilação líquida de CO₂ (A) e 31% na condutância estomática (gs). No estudo de Garcia et al. (2020), também foram observadas reduções nas trocas gasosas das plantas submetidas ao encharcamento, com queda na taxa de assimilação líquida de CO₂ (A), aumento do fechamento estomático (gs) e redução da taxa de transpiração (E).

Em estudo realizado por Velasco et al. (2019), que avaliaram cinco cultivares de feijão sob hipóxia por um período de 14 dias, foram observadas reduções na A, variando entre 62-82%, gs de 73 a 97% e E de 51 a 92%. Ainda, verificou-se que duas cultivares apresentaram maior eficiência do uso da água (A/E) e menor perda de massa seca, portando, demonstrando maior tolerância a hipóxia. Dessa forma, genótipos suscetíveis tendem a sofrer maior redução na eficiência do uso da água e, conseqüentemente, fixam menos carbono por unidade de água perdida.

Assim como a absorção de nutrientes é prejudicada pela resistência ao fluxo de massa, a atividade fotossintética também sofre prejuízos. A redução da condutividade hidráulica diminui o potencial água, estimulando a produção de ácido abscísico nas folhas, o que resulta em fechamento estomático e na queda da atividade fotossintética. Além disso, a redução dos pigmentos fotossintéticos está diretamente relacionada à redução de *A*, pois a redução do teor relativo de clorofila pode comprometer o rendimento quântico aparente, reduzindo a eficiência na utilização de fótons para a assimilação de CO₂ (CECATTO JÚNIOR et al., 2022, 2024; SOUSA; SODEK, 2002; ZAHRA et al., 2021).

A redução do índice SPAD e dos pigmentos fotossintéticos aos 10 e 20 dias, evidenciada na figura 5, também é consequência da hipóxia nos tecidos radiculares. Nesta situação ocorre o aumento da síntese de ACC (ácido 1-carboxílico-1-aminociclopropano) precursor do etileno. Em concentrações elevadas nas folhas, o etileno estimula a atividade de enzimas clorofilase e oxidase que levam a degradação da clorofila (CECATTO JÚNIOR et al., 2022; PASSOS et al., 2015; ZAHRA et al., 2021). Além do etileno, a redução dos pigmentos fotossintéticos também pode ser atribuída à menor absorção de nutrientes, à limitação na produção de ATP e ao acúmulo de radicais livres (ROS) (SATHI et al., 2022; VELASCO et al., 2019).



Figura 5. Aspecto clorótico das folhas de plantas de soja aos 20 dias de encharcamento do solo. (A) plantas submetidas ao encharcamento e (B) plantas sem encharcamento (controle). Fonte: arquivo pessoal da autora.

4.5 VARIÁVEIS DE PRODUÇÃO

Para os componentes da produção, o número de vagens (NVAG), produção por planta (PROD) e altura de plantas (ALTURA), houve interação significativa entre os fatores em estudo pelo teste F ($P \leq 0,05$). Para o número de grãos (NGRA), número de nós (NNÓS), números de galhos (NGAL), número de grãos por vagem (Ng/Vg), massa de mil grãos (MMG) e a altura da primeira vagem (A1vag) não houve efeito significativo pelo teste F ($P \leq 0,05$) (Tabela 30 e 31).

Tabela 30- Resumo da análise de variância com valores de quadrado médio do número de grãos (NGRA), número de nós (NNÓS), números de galhos (NGAL), número de vagens (NVAG), produção por planta (PROD), altura de plantas (ALT), número de grãos por vagem (Ng/Vg), massa de mil grãos (MMG) e a altura da primeira vagem (A1vag), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos. Marechal Cândido Rondon - PR, 2023-2024.

FV	GL	NGRA	NNÓS	NGAL	NVAG	PROD
Estresse (E)	1	1568,00 ^{ns}	0,38 ^{ns}	1,75 ^{ns}	913,78 ^{ns}	13,08 ^{ns}
Bioinsumos (B)	3	956,81 ^{ns}	1,21 ^{ns}	0,50 ^{ns}	143,47 ^{ns}	89,27 ^{ns}
E x B	3	6777,14 ^{ns}	2,27 ^{ns}	0,34 ^{ns}	1546,76*	306,51*
Bloco	3	3686,47	2,59	2,32	733,85	66,47
Resíduo	21	2779,98	1,74	0,61	303,58	51,07
CV (%)		19,87	7,63	12,74	16,24	16,33
FV	GL	ALT	Ng/Vg	MMG	A1vag	
Estresse (E)	1	15,12 ^{ns}	0,05 ^{ns}	141,98 ^{ns}	0,38 ^{ns}	
Bioinsumos (B)	3	87,28 ^{ns}	0,01 ^{ns}	262,70 ^{ns}	1,77 ^{ns}	
E x B	3	154,75*	0,01 ^{ns}	183,93 ^{ns}	3,34 ^{ns}	
Bloco	3	14,71	0,01	241,19	6,63	
Resíduo	21	45,01	0,04	152,85	2,94	
CV (%)		8,32	8,71	7,47	17,73	

^{ns} não significativo; **, * significativo a 1% e a 5% de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

Tabela 31- Médias do número de grãos (NGRA), número de nós (NNÓS), números de galhos (NGAL), número de grãos por vagem (Ng/Vg), massa de mil grãos (MMG) e altura da primeira vagem (A1vag), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

Estresse	NGRA	NNÓS	NGAL	Ng/Vg	MMG	A1vag
	-	-	-	-	g	cm
Não encharcado	272,37	17,21	5,90	2,43	163,41	9,78
Encharcado	258,37	17,43	6,37	2,51	167,62	9,56
CV (%)	19,87	7,63	12,74	8,71	7,47	17,73
DMS	38,76	0,97	0,57	0,16	9,09	1,26
Bioinsumos						
Controle	251,50	17,06	6,25	2,47 ^{ns}	162,30	9,37
<i>A. brasilense</i>	263,18	17,56	6,00	2,42	161,97	9,43
<i>A. nodosum</i>	277,43	17,75	5,87	2,50	174,03	9,50
AZ + AN	269,37	16,93	6,43	2,50	163,76	10,37
DMS	73,50	1,84	1,09	0,30	17,23	2,39

Nota, ^{ns} não significativo pelo teste F a 5% de probabilidade; médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Tratamentos: controle = controle; *A. brasilense* = inoculação de sementes com *A. brasilense*; *A. nodosum* = aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*; AZ+AN = inoculação de sementes com *A. brasilense* + aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*.

A altura das plantas no tratamento controle submetido ao encharcamento apresentou reduções de 17% ao comparar com o controle sem encharcamento. Ainda, as plantas submetidas ao encharcamento e que receberam a aplicação foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) apresentaram incrementos da ordem de 23% ao comparar com o controle encharcado (Tabela 32).

Quanto ao número de vagens, as plantas inoculadas com *A. brasilense* e submetidas ao encharcamento apresentaram reduções de 31% ao comparar com plantas inoculadas sem encharcamento (Tabela 32).

Ainda, as plantas submetidas ao encharcamento que receberam a aplicação foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) apresentaram aumentos no número de vagem de 27% ao comparar com as plantas que receberam a aplicação foliar sem encharcamento (Tabela 32).

Em relação à produção por planta, as plantas inoculadas com *A. brasilense* e submetidas ao encharcamento apresentaram reduções de 26% ao comparar com as plantas inoculadas sem encharcamento. Ainda, as plantas que receberam a aplicação foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) e submetidas ao encharcamento apresentaram aumentos de 40% na produção por plantas em comparação com as plantas que receberam a aplicação foliar sem encharcamento (Tabela 32).

As plantas submetidas ao encharcamento e que receberam a aplicação foliar de extrato de algas (*A. nodosum*) apresentaram aumentos na produção por plantas de 49; 56 e 33%, respectivamente, ao comparar com o controle, inoculação com *A. brasilense* e a combinação da inoculação com *A. brasilense* e a aplicação foliar de extrato de algas (Tabela 32).

Tabela 32- Médias da altura de plantas (ALT), número de vagens (NVAG) e produção por planta (PROD), de plantas de soja, cultivar P96y90, em função dos fatores: 1 - sem e com encharcamento e 2 - aplicação de bioinsumos. Marechal Cândido Rondon – PR, 2023-2024.

	ALT		NVAG		PROD	
	cm		Vag. /planta		g/planta	
	Estresse		Estresse		Estresse	
Bioinsumos	NE	E	NE	E	NE	E
Controle	82,25 Aa	70,00 Bb	109,25 Aa	93,62 Aa	43,02 Aa	37,72 Ab
<i>A. brasilense</i>	79,00 Aa	81,15 Aab	130,75 Aa	89,75 Ba	48,98 Aa	36,07 Bb
<i>A. nodosum</i>	78,25 Aa	86,37 Aa	97,37 Ba	123,75 Aa	40,19 Ba	56,38 Aa
AZ + AN	85,50 Aa	82,37Aab	113,25 Aa	100,75 Aa	45,37 Aa	42,28 Ab
CV (%)	8,32		16,24		16,33	
DMS (Estresse)	9,86		25,62		10,50	
DMS (Bioinsumos)	13,22		34,35		14,09	

As colunas seguidas de letras minúsculas e as linhas seguidas de letras maiúsculas são semelhantes não diferem entre si pelo teste de Tukey com 5% de probabilidade. Tratamentos: controle = controle; *A. brasilense* = inoculação de sementes com *A. brasilense*; *A. nodosum* = aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*; AZ+AN = inoculação de sementes com *A. brasilense*+ aplicação foliar de extrato de algas de *A. nodosum*. NE= não encharcado; E= encharcado.

Resultados semelhantes e divergentes foram encontrados no estudo de Andrade Silva et al. (2023), que avaliaram o efeito de diferentes bioestimulantes na cultura da soja exposta à hipóxia por um período chuvoso de 38 dias. A aplicação de extrato de algas impactou positivamente o número de ramos, a massa fresca da parte aérea e a produção. No entanto, não foi observada influência dos bioestimulantes no

número de nós, número de vagens e número de grãos por planta. Em relação à altura, as plantas que receberam o extrato de alga apresentaram menores alturas, diferindo dos resultados obtidos no presente estudo. Além disso, foi constatado que os bioestimulantes Valina, aminoácidos e extratos de algas se destacaram, demonstrando efeitos positivos nas características avaliadas, mantendo o desenvolvimento sob estresse e contribuindo para o aumento da produtividade.

No estudo de Fante et al. (2010), que avaliaram a tolerância da soja ao encharcamento em diferentes estádios fenológicos, observou-se que plantas submetidas ao encharcamento no estágio R₄ não apresentaram diferenças significativas na massa de grãos e no número de grãos, ao comparar com o controle.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo gerou informações relevantes sobre a mitigação do estresse por encharcamento com o uso de *A. brasilense* e extrato de algas (*A. nodosum*).

O encharcamento do solo impactou negativamente o desenvolvimento da soja, ocorrendo reduções significativas nos teores foliares de N e P, bem como na taxa de assimilação de CO₂, condutância estomática, índice SPAD e pigmentos fotossintéticos. Mesmo assim, as plantas desenvolveram mecanismos de aclimação, como formação de aerênquimas, aumento no diâmetro de caule, produção de raízes superficiais, indicando que a soja possui estratégias para mitigar condições de hipóxia.

Sobre os bioinsumos, estes podem desempenhar um papel importante no manejo do estresse, mas suas respostas podem ser variáveis. Os tratamentos não foram eficazes na mitigação dos efeitos negativos sobre a atividade fotossintética e os teores nutricionais.

Ao analisar os tratamentos, observa-se que uso do extrato de algas (*A. nodosum*) mostrou ser mais promissor para a mitigação do estresse, ao apresentar aumentos em variáveis biométricas e produtivas. O uso do *A. brasilense* não apresentou muita influência na mitigação, sendo mais responsivo em situações sem encharcamento.

Estes resultados, apesar de apresentarem diversas respostas, mostram que a cultura da soja responde de forma diferente para as diferentes combinações de microrganismo e bioestimulantes, sendo algumas mais promissoras que outras.

Portanto, se faz necessário o estudo com diferentes cultivares, pois estas podem apresentar respostas variadas, além disso, o modo de imposição do encharcamento poderia ser adaptado para manter a lâmina d'água acima ou bem próxima à superfície dos vasos.

6. CONCLUSÕES

O encharcamento do solo causou efeitos negativos sobre a atividade fotossintética, o índice SPAD, pigmentos fotossintéticos e os teores foliares de nitrogênio (N) e fósforo (P).

A aplicação foliar de extrato de algas (*Ascophyllum nodosum*) foi mais eficaz na manutenção de características biométricas e produtivas, minimizando perdas de produção em plantas submetidas ao estresse por encharcamento, quando comparada à inoculação com *Azospirillum brasilense*.

A aplicação foliar de extrato de algas (*Ascophyllum nodosum*) e sua combinação com *A. brasilense* favoreceram o incremento do diâmetro do cilindro central e do número de metaxilemas, sugerindo uma melhoria na condução de água e nutrientes.

A inoculação com *A. brasilense* promoveu aumento no diâmetro da raiz e no número de metaxilemas, indicando possível estímulo ao desenvolvimento radicular.

Os efeitos de modulação do sistema radicular de plantas de soja em reposta à aplicação foliar de extrato de algas (*Ascophyllum nodosum*) e inoculação de sementes com *A. brasilense* são favoráveis e podem contribuir para a mitigação do estresse em plantas em condições de encharcamento.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEGOYE, G. A. et al. Waterlogging Effects on Soybean Physiology and Hyperspectral Reflectance during the Reproductive Stage. **Agriculture**, v. 13, n. 4, p. 844, 9 abr. 2023.

AHMED, M. et al. Effects of an *Ascophyllum nodosum* seaweed extract application dose and method on growth, fruit yield, quality, and water productivity of tomato under water-deficit stress. **South African Journal of Botany**, v. 151, p. 95–107, dez. 2022.

ALI, O.; RAMSUBHAG, A.; JAYARAMAN, J. Biostimulatory activities of *Ascophyllum nodosum* extract in tomato and sweet pepper crops in a tropical environment. **PLOS ONE**, v. 14, n. 5, p. e0216710, 14 maio 2019.

ALIZADEH, M. et al. Effect of foliar application of seaweed *Ascophyllum nodosum* extract on morpho-physiological characteristics of bean (*Phaseolus vulgaris*) under water stress. **Nova Biologica Reperta**, v. 9, n. 1, p. 61–69, 1 mar. 2022.

ANDRADE SILVA, R. et al. Physiological and Productive Role of Biostimulants in Alleviating Hypoxia Stress in Soybean Grown Under Field Conditions. **Gesunde Pflanzen**, v. 75, n. 6, p. 2713–2721, 1 dez. 2023.

AROCA, R.; PORCEL, R.; RUIZ-LOZANO, J. M. Regulation of root water uptake under abiotic stress conditions. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 1, p. 43–57, 1 jan. 2012.

BACANAMWO, M.; PURCELL, L. C. Soybean Root Morphological and Anatomical Traits Associated with Acclimation to Flooding. **Crop Science**, v. 39, n. 1, p. 143–149, jan. 1999a.

BACANAMWO, M.; PURCELL, L. C. Soybean dry matter and N accumulation responses to flooding stress, N sources and hypoxia. **Journal of Experimental Botany**, v. 50, n. 334, p. 689–696, jan. 1999b.

BANTI, V. et al. Low oxygen response mechanisms in green organisms. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 14, n. 3, p. 4734–4761, 2013.

BASHAR, K. K. et al. Phytohormone-Mediated Stomatal Response, Escape and Quiescence Strategies in Plants under Flooding Stress. **Agronomy**, v. 9, n. 2, p. 43, 22 jan. 2019.

BENDER, Ross R.; HAEGELE, Jason W.; BELOW, Frederick E. Nutrient Uptake, Partitioning, and Remobilization in Modern Soybean Varieties. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 2, p. 563–573, mar. 2015.

BRITO, T. S. **BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO VEGETAL ASSOCIADAS AO TRIGO: IMPACTOS NA ANATOMIA, FISIOLOGIA E PRODUTIVIDADE**. Tese—Marechal Cândido Rondon: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 10 fev. 2023.

BORELLA, J. et al. Atividade de enzimas fermentativas em raízes e nódulos de soja sob condições de hipóxia e pós-hipóxia. **Ciência Rural**, v. 43, n. 6, p. 970–977, jun. 2013.

BUGA, N. A. **Application of biostimulants on waterlogged cabbage to improve uptake of nutrients**. [s.l.] University of Zagreb Faculty of Agriculture, 2023.

BULEGON, L. G. et al. Respostas da soja ao *Azospirillum brasilense* e reguladores vegetais em condições de déficit hídrico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 4, p. 1–10, 2019a.

BULEGON, L. G. et al. Mitigation of drought stress effects on soybean gas exchanges induced by *Azospirillum brasilense* and plant regulators. **Pesq. Agropec. Trop**, v. 49, p. 1–9, 2019b.

CAPITULINO, Jessica Dayanne et al. Aspectos fisiológicos e crescimento do algodoeiro 'BRS topázio' cultivado com águas salinas e adubação potássica. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 12, n. 2, p. 267, 17 jun. 2017.

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

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.

CECATTO JÚNIOR, R. et al. Gas exchanges and soybean plant production in response to waterlogged soil and light restriction. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 17, n. 2, p. 1–8, 11 jun. 2022.

CECATTO JÚNIOR, R. et al. Daytime gas exchange in soybean plants submitted to waterlogging and shading. **Ciência Rural**, v. 54, n. 11, 2024.

CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira. **Boletim da Safra 2025**, v. 12, n. 7, p. 129, 2024.

CORDEIRO, E. C. N. et al. Can *Ascophyllum nodosum* extract application before or at drought stress trigger different metabolic adaptation responses in soybean plants? **Journal of Applied Phycology**, v. 36, n. 4, p. 2283–2293, 1 ago. 2024.

DALL'AGNOL, A. **A EMBRAPA SOJA NO CONTEXTO DO DESENVOLVIMENTO DA SOJA NO BRASIL Histórico e contribuições**. Brasília: Embrapa, 2016.

DAVANSO-FABRO, V. M. et al. Tolerância à inundação: aspectos da anatomia ecológica e do desenvolvimento de *Sesbania virgata* (Cav.) Pers. (Fabaceae). **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 41, n. 4, p. 475–482, ago. 1998.

DERAL. Departamento de Economia Rural. **Conjuntura: Boletim semanal 41/2024**, n. 41, p. 2-3, 2024. https://www.agricultura.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2024-10/boletim_semanal_41_deral_0.pdf. Acesso em: 12 out. 2024.

DE SAEGER, J. et al. Toward the molecular understanding of the action mechanism of *Ascophyllum nodosum* extracts on plants. **Journal of Applied Phycology**, v. 32, n. 1, p. 573–597, 10 fev. 2020.

DI STASIO, E. et al. *Ascophyllum nodosum*-based algal extracts act as enhancers of growth, fruit quality, and adaptation to stress in salinized tomato plants. **Journal of Applied Phycology**, v. 30, n. 4, p. 2675–2686, 28 ago. 2018.

DÖBEREINER, J.; BALDANI, I.J. Bases científicas para uma agricultura biológica. **Ciência e Cultura**, v.34, n.7, p.869-881, 1982.

DO ROSÁRIO ROSA, V. et al. Increased soybean tolerance to water deficiency through biostimulant based on fulvic acids and *Ascophyllum nodosum* (L.) seaweed extract. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 158, p. 228–243, jan. 2020.

DREW, M. C. Oxygen deficiency and root metabolism: Injury and Acclimation under Hypoxia and Anoxia. **Annual Review of Plant Biology**, v. 48, p. 223–250, 1997.

EMBRAPA. **Soja em números (safra 2024/25)**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos#:~:text=Soja%20em%20n%C3%BAmeros%20%28safra%202023%2F24%29%20Soja%20no%20mundo,de%20toneladas%20%C3%81rea%20plantada%3A%20138%2C52%20milh%C3%B5es%20de%20hectares>>. Acesso em: 09 jun. 2025.

ENGEL, D. C. H. et al. Algae Extract Increases Seed Production of Soybean Plants and Alters Nitrogen Metabolism. **Agriculture**, v. 13, n. 7, p. 1296, 25 jun. 2023.

ERTANI, A. et al. Evaluation of Seaweed Extracts From *Laminaria* and *Ascophyllum nodosum* spp. as Biostimulants in *Zea mays* L. Using a Combination of Chemical, Biochemical and Morphological Approaches. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, 6 abr. 2018.

FANTE, C. A. et al. Respostas fisiológicas em cultivares de soja submetidas ao alagamento em diferentes estádios. **Bragantia**, v. 69, n. 2, p. 253–261, 2010.

FAOSTAT. **Culturas e produtos pecuários**. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity>. Acesso em: 20 out. 2024.

FARQUHAR, G. D.; SHARKEY, T. D. Stomatal Conductance and Photosynthesis. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 33, n. 1, p. 317–345, jun. 1982.

FATIMAH, V. S.; NURHIDAYATI, T. Morphophysiological characteristic responses of Soybean (*Glycine max* L.) grobogan variety in waterlogging stress. **Eco. Env. & Cons.**, n. 26, p. 132–138, abr. 2020.

FATMA, M. et al. Ethylene Signaling under Stressful Environments: Analyzing Collaborative Knowledge. **Plants**, v. 11, n. 17, p. 2211, 25 ago. 2022.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. Stages of soybean development. **Ames**, 1977.

FERREIRA, D. F. SISVAR: A computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011.

FUKAMI, J. et al. Antioxidant activity and induction of mechanisms of resistance to stresses related to the inoculation with *Azospirillum brasilense*. **Arch Microbiol**, v. 200, p. 1191–1203, 2018.

GAMALERO, E.; GLICK, B. R. Ethylene and Abiotic Stress Tolerance in Plants. Em: **Environmental Adaptations and Stress Tolerance of Plants in the Era of Climate Change**. New York, NY: Springer New York, 2012. p. 395–412.

GARCIA, N. et al. Waterlogging tolerance of five soybean genotypes through different physiological and biochemical mechanisms. **Environmental and Experimental Botany**, v. 172, p. 103975, abr. 2020.

GUIMARÃES, V. F. et al. Bactérias Promotoras de Crescimento Vegetal: da FBN à regulação hormonal, possibilitando novas aplicações. **Ciências agrárias: Ética do cuidado, legislação e tecnologia na agropecuária**, p. 192–212, 2017.

GUPTA, S.; PANDEY, S. ACC Deaminase Producing Bacteria With Multifarious Plant Growth Promoting Traits Alleviates Salinity Stress in French Bean (*Phaseolus vulgaris*) Plants. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, 9 jul. 2019.

HARTMAN, S. et al. Ethylene-mediated nitric oxide depletion pre-adapts plants to hypoxia stress. *Nature Communications*, v. 10, n. 1, p. 4020, 5 set. 2019.

HOANG, E.; STEPHENSON, P. *Ascophyllum nodosum* SWE enhances root anatomy, but not POD activity in both a salt-tolerant and salt-sensitive soybean (*Glycine max*) variety exposed to salt stress. **MicroPubl Biol**, v. 3, n. 22, p. 7, 2024.

HUNGRIA, M. et al. Inoculation with selected strains of *Azospirillum brasilense* and *A. lipoferum* improves yields of maize and wheat in Brazil. **Plant Soil**, v. 331, p. 413–425, 2010.

JOHANSEN DA (1941) **Plant Microtechnique**, 1st edn. McGraw-Hill Book Company, New York.

JOSHI-PANERI, J.; CHAMBERLAND, G.; DONNELLY, D. Effects of *chelidonium majus* and *ascophyllum nodosum* extracts on growth and photosynthesis of soybean. **Acta Agrobotanica**, v. 73, n. 1, p. 1–6, 2020.

KHAN, M. I. R. et al. The significance and functions of ethylene in flooding stress tolerance in plants. **Environmental and Experimental Botany**, v. 179, p. 104-188, nov. 2020.

KIM, Y. et al. Exo-ethylene application mitigates waterlogging stress in soybean (*Glycine max* L.). **BMC Plant Biology**, v. 18, n. 1, p. 254, 22 dez. 2018.

KIM, Y.-H. et al. Comparative analysis of endogenous hormones level in two soybean (*Glycine max* L.) lines differing in waterlogging tolerance. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, 17 set. 2015.

KRAUS, J. E.; ARDUIN, M. **Manual básico de métodos em morfologia vegetal**. EDUR ed. Seropédica: [s.n.].

KUMARI, S. et al. *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jolis, a Pivotal Biostimulant toward Sustainable Agriculture: A Comprehensive Review. **Agriculture**, v. 13, n. 6, p. 1179, 31 maio 2023.

LANA, M. C. et al. **Análise química de solo e de tecido vegetal: metodologias analíticas**. 2. ed. Cascavel: EDUNIOESTE, 2016.

LICHTENTHALER, Hartmut K. [34] Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. In: [S.l.: S.n.]. p. 350–382.

MAPA. **Regras para análise de sementes**. Brasília: [s.n.]. v. 1

MARTYNENKO, A. et al. Thermal imaging of soybean response to drought stress: the effect of *Ascophyllum nodosum* seaweed extract. **SpringerPlus**, v. 5, n. 1, p. 1393, 22 dez. 2016.

MIGNOLLI, Francesco et al. Roots to the Rescue: Adventitious Roots Sustain Photosynthesis Resumption in Post-Flooded Tomato Plants. **Journal of Plant Growth Regulation**, 23 out. 2024.

MINISTÉRIO DA FAZENDA. PIB Brasil - Geral e Agropecuário: Primeiro Trimestre 2024. **PIB Brasil - Geral e Agropecuário**, v. 1, p. 1–8, 4 jun. 2024.

MOCHIZUKI, T. et al. **Formação de aerênquima secundário e resposta de crescimento radicular de mudas de soja (*Glycine max*) em condições de inundação**. Proceedings of the 7th Asian Crop Science Association Conference. Anais...Research Center for Bioresources and Biotechnology, Bogor Agricultural University, jan. 2013. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/2324/1790501>>

MÓGOR, Á. F.; MÓGOR, G. **Aminoácidos, extratos de algas, extratos vegetais e substâncias húmicas como biofertilizantes**. 1. ed. São Paulo: Pecege, 2022.

MORETTI, L. G. et al. Effects of growth-promoting bacteria on soybean root activity, plant development, and yield. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 1, p. 418–428, 16 jan. 2020.

NAOE, A. M. DE L. et al. Coinoculação com *Azospirillum brasilense* em cultivares de soja submetidas a déficit hídrico. **Rev. bras. eng. agrícola ambiente**, v. 24, n. 2, 2020.

NGUYEN, T.-N. et al. Hormonal regulation in adventitious roots and during their emergence under waterlogged conditions in wheat. **Journal of Experimental Botany**, v. 69, n. 16, p. 4065–4082, 18 jul. 2018.

NGUYEN, V. T. et al. Mapping of Quantitative Trait Loci Associated with Resistance to *Phytophthora sojae* and Flooding Tolerance in Soybean. **Crop Science**, v. 52, n. 6, p. 2481–2493, nov. 2012.

NOVAES, R. F. DE; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. DE. Ensaio em ambiente controlado. Em: OLIVEIRA, A. J. et al. (Eds.). **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília DF: Embrapa-SE, 1991. p. 189–253.

OLIVEIRA, A. L. M.; URQUIAGA, S.; BALDANI, J. I. Processos e mecanismos envolvidos na influência de microrganismos sobre o crescimento vegetal. **Seropédica: Embrapa Agrobiologia**, 2003. 21p.

PASSOS, G. P. et al. **VII Congresso Brasileiro de Soja- MERCOSOJA. RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E CRESCIMENTO DE PLANTAS DE SOJA SUBMETIDAS AO ESTRESSE POR ENCHARCAMENTO**. Anais...Florianópolis: 22 jun. 2015.

PAULETTI, V.; MOTTA, A.C. V. **Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná**. 2. ed. Curitiba: Núcleo Estadual Paraná da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo- NEPAR-SBCS, 2019.

PEREIRA, L. et al. A concise review of the brown macroalga *Ascophyllum nodosum* (Linnaeus) Le Jolis. **Journal of Applied Phycology**, v. 32, n. 6, p. 3561–3584, 2 dez. 2020.

PEREIRA, F. H. F. et al. Trocas gasosas, eficiência fotoquímica e potencial osmótico de plantas de tomate submetidas a condições salinas. **PesquisAgro**, v. 3, n. 1, p. 36–51, 4 ago. 2020.

PLOSCHUK, R. A.; MIRALLES, D. J.; STRIKER, G. G. A quantitative review of soybean responses to waterlogging: agronomical, morpho-physiological and anatomical traits of tolerance. **Plant and Soil**, v. 475, n. 1–2, p. 237–252, 24 jun. 2022.

POSSO, D. A. et al. Root flooding-induced changes in the dynamic dissipation of the photosynthetic energy of common bean plants. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 40, n. 12, p. 212, 21 dez. 2018.

RADWAN, M. A. et al. Biological control of the root-knot nematode, *Meloidogyne incognita* on tomato using bioproducts of microbial origin. **Applied Soil Ecology**, v. 56, p. 58–62, maio 2012.

REPKE, R. A. et al. Increased soybean tolerance to high-temperature through biostimulant based on *Ascophyllum nodosum* (L.) seaweed extract. **Journal of Applied Phycology**, v. 34, n. 6, p. 3205–3218, 20 dez. 2022.

RINALDI, L. K. et al. Control of *Meloidogyne javanica* and induction of resistance-associated enzymes in soybean by extracts of *Ascophyllum nodosum*. **Journal of Applied Phycology**, v. 33, n. 4, p. 2655–2666, 4 ago. 2021.

RINALDI, L. K. et al. Combined effects of *Ascophyllum nodosum* seaweed extract and biological control agents on *Meloidogyne javanica* in soybean. **Canadian Journal of Plant Pathology**, v. 45, n. 3, p. 340–350, 4 maio 2023.

RONDINA, A. B. L. et al. Changes in root morphological traits in soybean co-inoculated with *Bradyrhizobium* spp. and *Azospirillum brasilense* or treated with *A. brasilense* exudates. **Biology and Fertility of Soils**, v. 56, n. 4, p. 537–549, 26 mar. 2020.

SAIRAM, R. K. et al. Physiology and biochemistry of waterlogging tolerance in plants. **Biologia Plantarum**, v. 52, n. 3, p. 401–412, 2008.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa solos, 2018.

SASIDHARAN, R.; VOESENEK, L. A. C. J. Ethylene-Mediated Acclimations to Flooding Stress. **Plant Physiology**, v. 169, n. 1, p. 3–12, set. 2015.

SATHI, K. S. et al. Screening of Soybean Genotypes for Waterlogging Stress Tolerance and Understanding the Physiological Mechanisms. **Advances in Agriculture**, v. 2022, p. 1–14, 12 jan. 2022.

SECRETARIA DE COMÉRCIO EXTERIOR. **Balança Comercial Mensal - Dados Consolidados Setembro/2024**. Disponível em: <https://balanca.economia.gov.br/balanca/publicacoes_dados_consolidados/nota.html>. Acesso em: 20 out. 2024.

SHAO, G. C. et al. Photosynthesis and growth of winter wheat in response to waterlogging at different growth stages. **Photosynthetica**, v. 51, n. 3, p. 429–437, 1 set. 2013.

SHARMA, A. et al. Abiotic Stress Management in Plants: Role of Ethylene. Em: **Molecular Plant Abiotic Stress**. [s.l.] Wiley, 2019. p. 185–208.

SHIMOIA, E. P. et al. Co-inoculation of Seeds with *Bradyrhizobium*, *Azospirillum*, and *Rhizophagus* Improves Nitrogen Assimilation and Growth in Soybean Plants Subjected to Waterlogging. **Russian Journal of Plant Physiology**, v. 70, n. 6, p. 146, 1 dez. 2023.

SHUKLA, P. S. et al. Seaweed extract improve drought tolerance of soybean by regulating stress-response genes. **AoB PLANTS**, v. 10, n. 1, 1 fev. 2018.

SHUKLA, P. S. et al. Ascophyllum nodosum-Based Biostimulants: Sustainable Applications in Agriculture for the Stimulation of Plant Growth, Stress Tolerance, and Disease Management. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, 29 maio 2019.

SIBLE, C. N.; SEEBAUER, J. R.; BELOW, F. E. Plant Biostimulants: A Categorical Review, Their Implications for Row Crop Production, and Relation to Soil Health Indicators. **Agronomy**, v. 11, n. 7, p. 1297, 26 jun. 2021.

SILVA, A. V. DA et al. Efeitos do bioestimulante Agri Gold® (Ascophyllum nodosum) no crescimento e desenvolvimento da soja. **Brazilian Journal of Science**, v. 2, n. 1, p. 72–81, 1 jan. 2023.

SMETHURST, Christiane F.; GARNETT, Trevor; SHABALA, Sergey. Nutritional and chlorophyll fluorescence responses of lucerne (Medicago sativa) to waterlogging and subsequent recovery. **Plant and Soil**, v. 270, n. 1, p. 31–45, mar. 2005.

SOUSA, C. A. F. DE; SODEK, L. The metabolic response of plants to oxygen deficiency. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 14, n. 2, p. 83–94, ago. 2002.

SOUZA, S. C. R.; MAZZAFERA, P.; SODEK, L. Flooding of the root system in soybean: biochemical and molecular aspects of N metabolism in the nodule during stress and recovery. **Amino Acids**, v. 48, n. 5, p. 1285–1295, 29 maio 2016.

SRIVASTAVA, A. et al. Biochemical, physiological and molecular aspects of waterlogging tolerance in economically important oilseed crops rapeseed, sesame and soybean. **Genetika**, v. 56, n. 1, p. 221–241, 2024.

SUJATA et al. Alleviating Drought Stress in Brassica juncea (L.) Czern & Coss. by Foliar Application of Biostimulants—Orthosilicic Acid and Seaweed Extract. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 195, n. 1, p. 693–721, 20 jan. 2023.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal** .pdf. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

THOMAS, A. L.; GUERREIRO, S. M. C.; SODEK, L. Aerenchyma Formation and Recovery from Hypoxia of the Flooded Root System of Nodulated Soybean. **Annals of Botany**, v. 96, n. 7, p. 1191–1198, 1 dez. 2005.

VALLIYODAN, B. et al. Expression of Root-Related Transcription Factors Associated with Flooding Tolerance of Soybean (Glycine max). **International Journal of Molecular Sciences**, v. 15, n. 10, p. 17622–17643, 29 set. 2014.

VELASCO, N. F. et al. Photosynthetic responses and tolerance to root-zone hypoxia stress of five bean cultivars (Phaseolus vulgaris L.). **South African Journal of Botany**, v. 123, p. 200–207, jul. 2019.

VITOR, S. C.; SODEK, L. Products of anaerobic metabolism in waterlogged roots of soybean are exported in the xylem. **Plant Science**, v. 284, p. 82–90, 1 jul. 2019.

VURUKONDA, S. S. K.; VARDHARAJULA, S.; SHRIVASTAVA, M.; SKZ, A. Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. **Elsevier**, v.184, p.13-24, 2016

YAMAUCHI, T. et al. Regulation of Root Traits for Internal Aeration and Tolerance to Soil Waterlogging-Flooding Stress. **Plant Physiology**, v. 176, n. 2, p. 1118–1130, fev. 2018.

ZAHRA, N. et al. Hypoxia and Anoxia Stress: Plant responses and tolerance mechanisms. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 207, n. 2, p. 249–284, 9 abr. 2021.

ZHANG, S.; LI, Q.; MA, K.; CHEN, L. Temperature-dependent gas exchange and stomatal/non-stomatal limitation to CO₂ assimilation of *Quercus haotugensis* under midday higher irradiance. **Photosynthetica**, v.39, p.383-388, 2001.

ZHANG, H. et al. Depicting the molecular responses of adventitious rooting to waterlogging in melon hypocotyls by transcriptome profiling. **3 Biotech**, v. 11, n. 7, p. 351, 21 jul. 2021.