



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Instituto de Biociências – Câmpus de Botucatu/Rio Claro
Seção Técnica de Pós-Graduação



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOLOGIA VEGETAL (INTERUNIDADES)

**Comunicação vegetal por meio de exsudatos fenólicos em *Zea mays*
L. exposta a salinidade em meio hidropônico.**

GINO COELHO DE SOUZA



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Instituto de Biociências – Câmpus de Botucatu/Rio Claro
Seção Técnica de Pós-Graduação



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOLOGIA VEGETAL (INTERUNIDADES)

Comunicação vegetal por meio de exsudatos fenólicos em *Zea mays* *L.* exposta a salinidade em meio hidropônico.

GINO COELHO DE SOUZA

LUIZ FERNANDO ROLIM DE ALMEIDA

Dissertação apresentada ao Instituto de Biociências, Câmpus de (Botucatu), UNESP, para obtenção do título de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal Interunidades entre o Instituto de Biociências do câmpus de Botucatu e Instituto de Biociências do câmpus de Rio Claro.

S729c Souza, Gino
Comunicação vegetal por meio de exsudatos fenólicos em Zea mays L. exposta a salinidade em meio hidropônico. / Gino Souza. -- Botucatu, 2025
25 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências, Botucatu
Orientador: Luiz Almeida

1. Compostos fenólicos. 2. Sistema radicular. 3. Infoquímicos. 4. Interação planta-planta. 5. Salinidade. I. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa amplia o entendimento sobre os mecanismos de comunicação entre plantas, abrindo caminho para o desenvolvimento de técnicas e estudos mais precisos no futuro. Os resultados podem ser aplicados em áreas como a agronomia, contribuindo para um manejo mais eficiente das culturas; na ecologia, ao revelar novos aspectos das interações vegetais no ambiente; e na biotecnologia, ao favorecer o aprimoramento de estratégias que utilizem a comunicação química entre plantas como ferramenta para otimizar o cultivo agrícola.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research broadens the understanding of the mechanisms of communication between plants, paving the way for the development of more precise techniques and studies in the future. The results can be applied in areas such as agronomy, contributing to a more efficient management of crops; in ecology, by revealing new aspects of plant interactions in the environment; and biotechnology, by promoting the improvement of strategies that use chemical communication between plants as a tool to optimize agricultural cultivation.

GINO COELHO DE SOUZA

Comunicação vegetal por meio de exsudatos fenólicos em *Zea mays* L. exposta a salinidade em meio hidropônico.

Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências, Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Biologia Vegetal.

Área de concentração: Ecofisiologia

Data da defesa: 07/02/2025

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luiz Fernando Rolim de Almeida
Departamento de Biodiversidade e Bioestatística / Instituto de Biociências de Botucatu - UNESP

Prof.a Dr.a GIUSEPPINA PACE PEREIRA LIMA (Participação Virtual)
Departamento de Ciências Químicas e Biológicas / Instituto de Biociências de Botucatu – UNESP

Prof.a Dr.a ANGÉLICA LINO RODRIGUES (Participação Virtual)
Departamento de Ciências e Saúde / Univeridade do Sagrado Coração – Unisagrado

Prof. Dr. FELIPE GIROTTTO CAMPOS (Participação Virtual)
Departamento de Biodiversidade e Bioestatística / Instituto de Biociências de Botucatu - UNESP

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - 88881.846505/2023.1, com a bolsa iniciada em Fevereiro de 2023 e encerrada em Janeiro de 2025. Agradecimentos também a toda a verba PROEX recebida durante o período de pesquisa, ajudando a complementar e enriquecer o estudo.

O apoio do Laboratório de Química e Bioquímica Vegetal (LQBV) nas análises bioquímicas e enzimáticas foi imprescindível para o presente estudo, com menções especiais a estudante de doutorado Sinara Santana e a professora doutora Giuseppina Pace Pereira pela considerável colaboração na pesquisa.

Por fim, agradeço todo o apoio intelectual na confecção do projeto de pesquisa e na ajuda durante sua posterior implementação em casa de vegetação a Priscila Pegorin, parceira de laboratório e do mesmo programa de pós-graduação.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	OBJETIVOS.....	12
2.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>13</i>
2.2	<i>Objetivo Específico.....</i>	<i>13</i>
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	13
3.1	<i>Espécie vegetal.....</i>	<i>13</i>
3.2	<i>Localização e procedimentos.....</i>	<i>13</i>
3.3	<i>Desenho experimental.....</i>	<i>14</i>
3.4	<i>Análise do teor total de fenólicos.....</i>	<i>15</i>
3.5	<i>Análise do teor total de flavonoides.....</i>	<i>16</i>
3.6	<i>Atividade enzimática da peroxidase (POD - EC 1.11.1.7).....</i>	<i>16</i>
3.7	<i>Atividade enzimática da polifenoloxidase (PPO - EC 1.10.3.1).....</i>	<i>16</i>
3.8	<i>Análises fisiológicas.....</i>	<i>17</i>
4	ANÁLISES ESTATÍSTICA.....	17
5	RESULTADOS.....	18
5.1	<i>Análise de componentes principais entre variáveis fisiológicas e bioquímicas.....</i>	<i>18</i>
5.2	<i>Teor total de fenólicos exsudados no meio hidropônico.....</i>	<i>18</i>
5.3	<i>Teor total de fenólicos no tecido radicular.....</i>	<i>19</i>
5.4	<i>Flavonoides totais no tecido radicular</i>	<i>20</i>
5.5	<i>Atividade enzimática da POD e PPO nas raízes.....</i>	<i>21</i>
5.6	<i>Fluorescência da clorofila a.....</i>	<i>22</i>
5.7	<i>Relação entre tratamentos em contato com meios hidropônicos distintos</i>	<i>23</i>
6	DISCUSSÃO	24
7	CONCLUSÃO.....	27
	REFERÊNCIAS.....	28

RESUMO

A transmissão de informações químicas para as imediações confere aos vegetais vantagens na sobrevivência frente às adversidades. Comumente chamada de comunicação vegetal, todos os órgãos são capazes de realizar esse processo, desde as folhas por meio de compostos voláteis como as raízes por exsudados. Os exsudados moldam a rizosfera, sendo rico em substâncias e dentre elas estão os compostos fenólicos, advindos do metabolismo especializado. A salinidade é um estresse que atinge diretamente o sistema radicular, alterando seu funcionamento e sua dinâmica com o ambiente circundante. O presente trabalho objetivou compreender como os exsudatos radiculares do grupo dos fenólicos de *Zea mays* L., em estresse salino e ausente, afetam a fisiologia e bioquímica de plantas em meio hidropônico. O experimento contou com dois tratamentos doadores: um com plantas cultivadas sob estresse salino (120 mM de NaCl) e outro sem salinidade. Cada doador teve 50 mL do seu meio hidropônico coletado e transferido para tratamentos receptores. Os receptores foram divididos em duas condições: um recebia a solução pura, sem alterações, e outro a solução previamente aquecida a 60 °C. O aquecimento objetivou degradar compostos orgânicos que não fossem fenólicos presentes no meio coletado. Análises de fluorescência da clorofila *a*, trocas gasosas, enzimáticas (POD e PPO), flavonoides e fenólicos totais, das raízes e do coletado, foram realizadas. Os resultados demonstraram que a exsudação e os fenólicos no tecido foram maiores em tratamentos que receberam o coletado puro de doadores sem contato com meio salinizado em relação aos em contato com o coletado de doadores sob salinidade. O *quenching* fotoquímico foi o único parâmetro fisiológico a diferir e apenas nos tratamentos que receberam o coletado de doadores sem salinidade, seja o aquecido ou o puro. A atividade enzimática variou em todos os tratamentos, tanto aqueles em contato com o coletado de doadores em salinidade quanto o proveniente dos ausentes do estressor. Os flavonoides apresentaram menores concentrações em tratamentos expostos ao coletado de doadores sem salinidade, em comparação àqueles em contato com a solução proveniente de doadores sob estresse salino. Concluímos que plantas expostas ao coletado puro de indivíduos cultivados sem salinidade variaram consideravelmente em comparação àqueles em contato com o coletado de meios salinizados. O aquecimento prévio do coletado também ocasionou diferenças entre os tratamentos,

principalmente naqueles que recebiam o coletado proveniente de plantas sob estresse, constatando que a comunicação vegetal por fenólicos sofre influência da salinidade e aquecimento.

Palavras-chave: compostos fenólicos; sistema radicular; infoquímicos; interação planta-planta; aquecimento.

ABSTRACT

The transmission of chemical information to the immediate environment gives the plant advantages in survival against adversities. Commonly called plant communication, all organs are able to carry out this process, since the leaves by means of compounds volatiles as the roots by exudates. The exudates shape the rhizosphere, being rich in substances and among them are phenolic compounds, derived from specialized metabolism. Salinity is a stress that directly affects the root system, altering its functioning and its dynamics with the surrounding environment. The present study aimed to understand how root exudates of the phenolic group of *Zea mays* L., in salt and absent stress, affect the physiology and biochemistry of plants in hydroponic medium. The experiment had two donor treatments: one with plants grown under salt stress (120 mM of NaCl) and another without salinity. Each donor had 50 mL of its hydroponic medium collected and transferred to receiving treatments. The receptors were divided into two conditions: one received the pure solution, without alterations, and the other the solution previously heated to 60 °C. The heating aimed to degrade organic compounds that were not phenolic present in the collected medium. Fluorescence analysis of chlorophyll a, gas exchange, enzymatic (POD and PPO), flavonoids and total phenolics, of the roots and collected, were performed. The results showed that exudation and phenolics in the tissue were higher in treatments that received the pure collection of donors without contact with salinized medium compared to those in contact with the collection of donors under salinity. Photochemical quenching was the only physiological parameter to differ and only in treatments that received the sample from donors without salinity, either heated or pure. The enzymatic activity varied in all treatments, both those in contact with the salt donors collected and those from the stressors absent. The flavonoids showed lower concentrations in treatments exposed to the sample of non-salinity donors, compared to those in contact with the solution from donors under saline stress. We concluded that plants exposed to the pure collection of individuals cultivated without salinity varied considerably in comparison with those in contact with the collected from salinized media. The previous heating of the collected also caused differences between treatments, especially in those that received the collected from plants under stress, noting that the plant communication by phenolics is influenced by salinity and heating.

Keywords: phenolic compounds; root system; infochemicals; plant-plant interaction; heating.

1. INTRODUÇÃO

A descoberta de que vegetais são capazes de estabelecer complexas formas de comunicação com outros organismos do seu entorno impulsionou extensos estudos voltados para a compreensão dos mecanismos metabólicos, fisiológicos e genéticos responsáveis (Elhakeem *et al.*, 2018; Yamashita *et al.*, 2021). Transmitir informações beneficia os vegetais em amplos contextos, dentre eles na diferenciação de parentes próximos de competidores em potencial ou em interações com microrganismos na rizosfera, variando entre os grupos vegetais em relação às classes de compostos químicos utilizados e as espécies que interagem (Kessler; Kalske, 2018; Takahashi *et al.*, 2021; Howard *et al.*, 2022). As substâncias envolvidas na transmissão de informações entre emissores e receptores são referidas comumente como infoquímicos e liberados por raízes, durante o processo de exsudação (Kong *et al.*, 2018; Ninkovic *et al.*, 2019), e folhas, por volatilização (Landi, 2020; Effah *et al.*, 2022).

Os infoquímicos são capazes de induzir mudanças nos vegetais, sejam da mesma espécie ou diferentes, caso sejam detectados e traduzidos em respostas fisiológicas que frequentemente conferem vantagens aos receptores em situações de estresse ou ameaça iminente (Song; Ryu, 2018; Meents; Mithöfer, 2020). Esse fato foi comprovado quando plantas são atacadas por herbívoros (Karban *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2021), sofrem dano mecânico (Meents; Mithöfer, 2020; Hagiwara; Shiojiri, 2020) ou simplesmente são tocadas (Markovic *et al.*, 2016; 2018), havendo a liberação de compostos voláteis orgânicos (VOCs, no inglês *Volatile Organic Compounds*) que possibilitam a aquisição de respostas prévias em indivíduos próximos não afetados. Os fitormônios, como o ácido jasmônico (JA) e moléculas derivadas dele, também estão envolvidos no desencadeamento de respostas fisiológicas entre plantas por meio de formas voláteis emitidas frequentemente pela parte aérea (Song; Ryu, 2018). Devido à natureza complexa e muitas vezes instável da maioria dos compostos químicos exsudados ou volatilizados envolvidos na comunicação entre vegetais, sua identificação e análise no contexto de interações planta-planta apresenta desafios consideráveis (Glinwood; Blande, 2016).

Além dos grupos de moléculas orgânicas previamente mencionados, podemos citar os compostos fenólicos, formados na rota metabólica do ácido chiquímico, no

qual a fenilalanina sofre ação da enzima fenilalanina amônia-liase (PAL, no inglês *phenylalanine ammonia liase*) e forma ácido cinâmico, um precursor de muitos outros fenólicos (Kumar *et al.*, 2020). Ingressam no ambiente por meio de volatilização, exsudação, decomposição ou lixiviação, desempenhando papéis cruciais em processos ecológicos e em contextos agronômicos, sendo amplamente usados na produção de pesticidas naturais (Zhu, 2015; Mushtaq *et al.*, 2020). Por serem liberados extensivamente pelo sistema radicular, representam um fluxo de carbono da parte aérea até o solo em formas orgânicas ativas (Khanam *et al.*, 2022; Heuermann *et al.*, 2023). Em interações entre plantas, são constantemente associados a alelopatia, conhecida como uma interação negativa entre vegetais e que provoca inibição de seu crescimento ou germinação por afetar seus processos fisiológicos (Kumar; Deb, 2023). Por conta disso, a alelopatia se distingue da comunicação vegetal que promove interações positivas, ainda que os benefícios imediatos sejam muitas vezes exclusivos para receptores (Kong *et al.*, 2018). Essa diferenciação ressalta a complexidade das interações químicas mediadas por fenólicos, que podem atuar tanto como ferramentas de defesa quanto como facilitadores de cooperação em comunidades vegetais (Gfeller *et al.*, 2019; Yamawo *et al.*, 2022).

Os fenólicos auxiliam na sobrevivência a diversos estressores ambientais abióticos, como radiação UV, variação de temperatura, seca e salinidade (Al-Khayri *et al.*, 2023; Chowdhary *et al.*, 2022; Rodríguez-Calzada *et al.*, 2019). Devido a sua localização, o sistema radicular é a primeira estrutura impactada em ambientes com altas concentrações de sais, resultando em redução do crescimento vegetativo ou, em casos extremos, na morte do vegetal (Hasan *et al.*, 2018; Hu *et al.*, 2022). Essas reduções no crescimento estão, em grande parte, associadas ao fechamento estomático, à desregulação do fotossistema II (PSII) causada pelo acúmulo de íons transportados das raízes para as folhas e à dificuldade na absorção de água (Shukry; Bayerly, 2015; Vineeth *et al.*, 2023; Stefanov *et al.*, 2024). Dentre os mecanismos fisiológicos usados para contornar o estresse salino, o aumento dos fenólicos nos tecidos é um dos fatores verificados em certas espécies e assumem papéis como moléculas antioxidantes ou osmoprotetores (Islam *et al.*, 2024). O aumento de fenólicos nos tecidos em resposta a salinidade também tem efeitos sobre a atividade enzimática de enzimas como a polifenoloxidase (PPO) e peroxidase (POD) que atuam como moléculas antioxidantes (Muhammad *et al.*, 2024; Stefanov *et al.*, 2024). O processo de exsudação também é afetado em ambientes salinos devido ao aumento da extrusão de íons excessivos ou em tentativas de estabelecer um gradiente osmótico favorável à absorção de água (Rahman *et al.*, 2021).

A liberação de infoquímicos pode ocorrer tanto na presença de estressores

como na ausência deles, exibindo plasticidade de acordo com a estrutura da comunidade e ambiente na qual o vegetal esteja inserido (Gfeller *et al.*, 2019; Effah *et al.*, 2019). Embora muitos estudos tenham explorado as formas de interação entre vegetais, a maioria concentrou-se na parte aérea das plantas, deixando lacunas significativas em relação aos processos que ocorrem abaixo do solo (Ninkovic *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2020). Atualmente é aceito que plantas por meio de compostos exsudatos conseguem diferenciar parentes próximos de competidores (Satoa *et al.*, 2018) e exibem certo grau de interação com eles na sincronização de seu crescimento vegetativo e reprodutivo (Wang *et al.*, 2020). As raízes também liberam compostos voláteis e outras moléculas que desempenham funções essenciais na rizosfera, no entanto os compostos fenólicos se destacam como as moléculas mais estáveis devido à sua estrutura química, lhes conferindo durabilidade mesmo quando a temperatura do solo varia (Hiremath *et al.*, 2024). No entanto, apesar de evidências que mostram que as moléculas exsudadas podem mediar interações entre indivíduos próximos, ainda não se sabe com precisão quais grupos de compostos estão diretamente envolvidos.

Como já mencionado, os compostos fenólicos são um grupo bem presente nos exsudatos radiculares e atuam fortemente na resposta a estressores, no entanto seu envolvimento como infoquímico representa uma lacuna considerável, tanto na presença de estressores quanto na ausência. Os poucos compostos fenólicos noticiados com funções na transmissão de informações entre indivíduos são o indol e o metil salicilato (MeSA), ambos voláteis liberados pela parte aérea (Meents; Mithöfer, 2020; Song; Ryu, 2018; Erb *et al.*, 2015). Estudos recentes, tais como os de Yamashita *et al.* (2021), com metil jasmonato (MeJA), e Elhakeem *et al.* (2018), com estresse mecânico, trazem uma abordagem para a liberação de compostos radiculares como forma de sinalização entre plantas, porém os respectivos trabalhos não objetivaram compostos fenólicos, evidenciando a necessidade de mais pesquisas direcionadas a esse grupo químico no contexto de interações vegetais no ambiente rizosférico.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Compreender como exsudatos radiculares do grupo dos fenólicos de milho (*Zea mays* L., cultivar Híbrido Dss 1001), em estresse salino e ausente, afetam plantas em contato com seu meio hidropônico. Acreditamos que plantas em contato com o meio hidropônico de indivíduos em estresse salino exibirão diferenças significativas

nos parâmetros fisiológicos, enzimáticos e bioquímicos em relação aos indivíduos apenas em contato com o meio de plantas ausentes de estressor.

2.2 Objetivo específico

Comparar alterações sofridas pelos vegetais em contato com o meio hidropônico de plantas em estresse salino em relação a aqueles em contato com meios de plantas ausentes do estressor. Os parâmetros abaixo serão levados em consideração para aferir se houve diferenças a depender da fonte que cada material teve contato:

- A) Mudanças na produção de compostos fenólicos e sua liberação no meio hidropônico por meio de análises bioquímicas;
- B) Alterações fisiológicas na fluorescência da clorofila *a* e trocas gasosas;
- C) Alta atividade enzimática de enzimas relacionadas com os compostos fenólicos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Espécie vegetal

Pertencendo à família das Poaceae/Gramíneas, o milho é uma espécie amplamente utilizada pela sociedade como grão para alimentação humana, ração para gado e aves, produtos de panificação e fornece matérias-primas importantes para as agroindústrias (Mushtaq *et al.*, 2020). Considerada uma glicófita com metabolismo C4, a espécie não possui tolerância a altas quantidades salinas presentes no solo, rapidamente apresentando queda nos processos fotossintéticos e reduzindo seu crescimento (Hasan *et al.*, 2018; Pandolfi *et al.*, 2016). Com sistema radicular fasciculado e capaz de estabelecer associações micorrízicas com microorganismos da rizosfera, a espécie consegue sobreviver a amplas adversidades ambientais (Yang *et al.*, 2020; Abedinzadeh *et al.*, 2019; Gao; Jonathan, 2016).

A variedade utilizada neste estudo foi obtida pela fornecedora Agranda Sementes e é caracterizada por ciclo precoce, florescimento dentro de 65 dias, com porte de até 2.35cm. Os grãos são do tipo dentado/duro, com sua cor sendo um amarelo/alaranjado e utilizado com a finalidade de grão, silagem ou milho-verde.

3.2 Localização e procedimentos

O experimento foi realizado em uma casa de vegetação do tipo Pad-fan sob luz natural localizada no Departamento de Biodiversidade e Bioestatística da Universidade Estadual de São Paulo (UNESP), na cidade de Botucatu, Brasil. A Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR, no inglês *Photosynthetically Active Radiation*) do ambiente foi por volta de 800 a 900 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, com temperatura variando entre 25°C e 38°C em dias comuns. A casa de vegetação é equipada com um sistema próprio de aeração que foi utilizado na oxigenação do meio de crescimento hidropônico dos vegetais. As sementes foram germinadas em vermiculita e suas plântulas, com até três folhas totalmente expandidas, transferidas posteriormente para potes de 750ml contendo a solução nutritiva de Hoagland (Hoagland; Arnon, 1950), também referida como solução de crescimento, a 25% de força iônica até sua aclimatação, que durou cerca de quatro dias.

Para evitar o surgimento de deficiências devido ao tempo do experimento e seu rápido crescimento, as plantas foram mantidas em solução nutritiva a 100% de força iônica até o final do período de coleta de dados. O pH do meio foi mantido entre 5.7 e 6.4 e a condutividade elétrica (EC, no inglês *Electrical Conductivity*) em 3,4 mS cm^{-1} , com medição feita com um phmetro de bolso (Akso). A condutividade elétrica do meio hidropônico salino foi o único diferente dos demais tratamentos por conta da alta quantidade de sais na solução. O meio de crescimento hidropônico era coletado a cada 5 dias e após isso o meio de crescimento era completamente trocado por uma nova solução de Hoagland, com os potes devidamente lavados antes da inserção da nova solução. Um total de 6 coletas do meio de crescimento de cada tratamento foi feito, totalizando 30 dias de experimentação de fevereiro de 2024 até março do mesmo ano.

3.3 Desenho experimental

Para o experimento de comunicação vegetal, dois tratamentos foram a fonte do meio hidropônico transferido para os demais, sendo eles o controle (ausentes de salinidade) e as plantas em meio salino (Figura 1). Desses tratamentos, 50ml do meio que cresciam era coletado e transferido para tratamentos nomeados Plantas Receptivas (PR), que recebiam o coletado sem alterações, e para o tratamento Plantas Receptivas Alteras (PRA), que tinham contato com o coletado previamente aquecido a 60°C por 30 minutos. O aquecimento da solução coletada objetivou degradar outras moléculas orgânicas além dos fenólicos presentes na amostra antes da distribuição para os respectivos tratamentos, salientando que após o aquecimento foi aguardado o resfriamento natural antes da transferência. Dependendo de qual tratamento recebeu os 50ml do coletado, seja a que veio do controle (C) ou das plantas em salinidade (PS),

foi adicionado as letras C e S na frente de sua sigla para determinar a fonte da solução que tiveram contato. A quantidade de sal utilizada foi de 120 mM NaCl, valor estipulado com base nos experimentos de estresse salino de Shukry e Bayerly (2015) para que os indivíduos não morressem até o final do período experimental. Foram 6 tratamentos com 6 indivíduos em cada, totalizando 36 plantas.

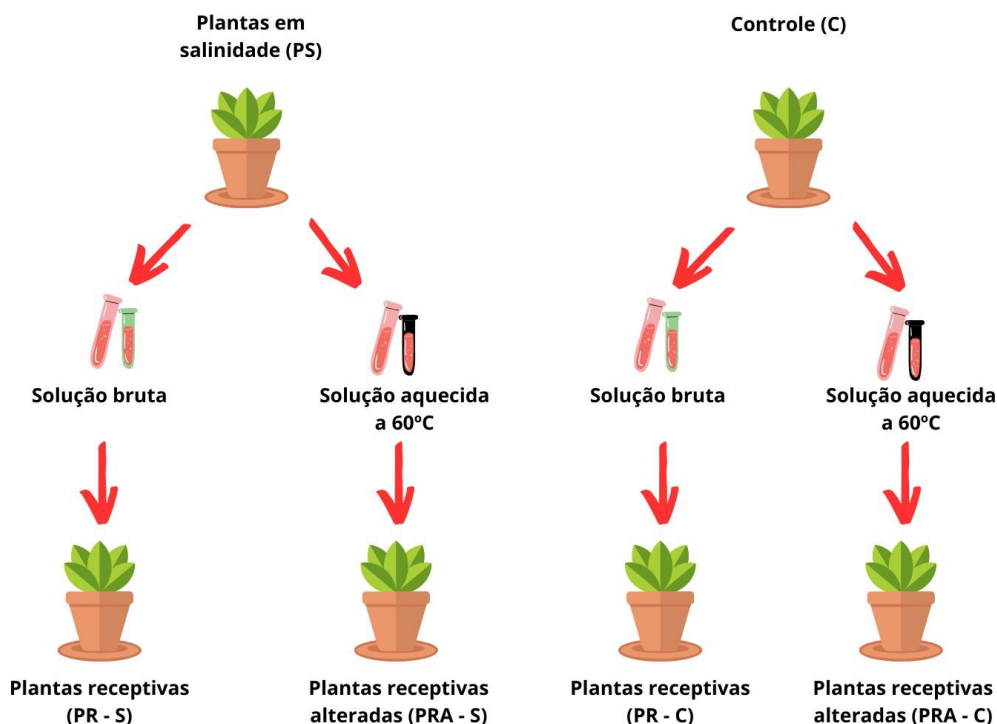


Figura 1 - Delineamento experimental da espécie *Zea mays* L. em experimentos de salinidade e controle.

3. 4 Análise do teor total de fenólicos

As amostras de solução coletadas em 5, 10, 15, 20, 25 e 30 dias foram secas a 38°C em estufa durante três dias e após esse período o material restante no fundo dos beakers foi raspado com espátulas e armazenado. O material radicular foi macerado com nitrogênio líquido e armazenado em freezers a -80°C. Para a análise de fenólicos totais foram pesados 300mg de material radicular e 50mg do material advindo das soluções, com ambos extraídos com 5ml de metanol a 80% apenas uma vez e feitos em triplicata. O material com o extrator foi levado para banho ultrassônico por 20 minutos e centrifugado a 5000 rpm durante 10 minutos, com o sobrenadante coletado posteriormente. Foram usados 0.5ml do reagente de *Folin-Ciocalteu*, 0.5ml de água destilada, 0.5ml do sobrenadante do material vegetal extraído e 2.5ml de carbonato de sódio (Na_2CO_3). O material ficou no escuro durante 1 hora e a subsequente leitura das amostras foi realizada na faixa de absorvância de 725 nm no espectrofotômetro, com

todos os procedimentos acima sendo baseados em Singleton *et al.* (1999).

3.5 Análise do teor total de flavonoides

Para a análise de flavonoides totais foram pesados 300mg de material radicular e extraídos em 5ml de metanol acidificado apenas uma vez. O material foi homogeneizado em banho ultrassônico por 30 minutos, logo após sendo acrescentado 1mL de Cloreto de Alumínio (Al^{3+}) a 5% e deixado no escuro. A centrifugação ocorreu em 6000 rpm durante 20 minutos em centrífuga refrigerada a 5°C e feitos em triplicata. A leitura ocorreu na faixa de absorbância de 425 nm no espectrofotômetro, com todos os procedimentos acima sendo baseados em Awad *et al.*, (2000).

3.6 Atividade enzimática da peroxidase (POD - EC 1.11.1.7)

Amostras de raízes foram coletadas em 5, 20 e 30 dias de experimentação, sendo moídas em nitrogênio líquido e logo após pesado 400mg. O pesado foi colocado em tubos de ensaio de plástico contendo 8ml de tampão fosfato de potássio (pH 6,7 a 0,2M) e centrifugado a 6000 rpm por 10 minutos. Durante o andamento da reação, foram usados 0.4mL de amostra, 0.5mL da solução A (Peróxido de hidrogênio (H_2O_2) a 30% e Tampão) e 0.5mL da solução B (Fenol e Aminoantipirina) em triplicatas. Os tubos de ensaio contendo a reação foram levados para banho-maria a 30°C durante 5 minutos e a reação foi parada logo depois colocando os tubos em meio líquido a 90°C. A posterior leitura foi realizada na faixa de absorbância de 505nm em espectrofotômetro, com todos os procedimentos acima sendo baseados em Lima *et al.*, (1999).

3.7 Atividade enzimática da polifenoloxidase (PPO - EC 1.10.3.1)

Amostras de raízes foram coletadas em 5, 20 e 30 dias de experimentação, sendo moídas em nitrogênio líquido e logo após pesado 400mg. O pesado foi colocado em tubos de ensaio de plástico contendo 8 ml de tampão fosfato de potássio (pH 6,7 a 0,2M) e levado para centrifugar a 6000 rpm por 10 minutos. Durante o andamento da reação, foram usados 0.3mL de amostra e 1.85mL de catecol a 0,1M e feitos em triplicata. Os tubos de ensaio contendo a reação foram levados para banho-maria a 30°C durante 30 minutos e a reação foi parada colocando os tubos em meio líquido a 90°C. A posterior leitura foi realizada na faixa de absorbância de 395 nm em espectrofotômetro, com todos os procedimentos acima sendo baseados em Kar e Mishra (1976).

3.8 Análises fisiológicas

A fluorescência da clorofila *a* foi medida usando um *Infra Red Gas Analyser* (IRGA- 6400), obtendo a máxima eficiência quântica do PSII (F_v/F_m), *quenching* fotoquímico (qP), *quenching* não fotoquímico (NPQ), fluorescência máxima adaptada ao escuro (F_m) e fluorescência mínima adaptada ao escuro (F_o) (Murchie; Lawson, 2013; Maxwell; Johnson, 2000). As trocas gasosas, especificamente a assimilação líquida de CO_2 (A , $\mu mol\ CO_2\ m^{-2}s^{-1}$), transpiração (E , $mmol\ m^{-2}s^{-1}$), Eficiência intrínseca do uso da água (WUE_i , $\mu mol\ CO_2/\mu mol\ H_2O$) e condutância estomática (g_s , $mmol\ m^{-2}s^{-1}$), também foram obtidas com os dados do IRGA.

A coleta dos dados foi feita no tempo de 5, 20 e 30 dias, com cada tratamento tendo 4 indivíduos e durante a coleta de dados foram escolhidos aleatoriamente. Dentre os 4 indivíduos coletados, os valores discrepantes foram retirados para manter a padronização dos dados. O horário das coletas iniciava às 9h da manhã e encerrava às 11:30, nunca estendendo além dessa faixa de tempo.

4. ANÁLISES ESTATÍSTICA

Todos os dados foram testados usando o teste estatístico de Kruskal-Wallis e seguido pelo teste *Pós-hoc* de Dunn para comparações múltiplas globais entre os grupos, com os valores de p ajustados pelo método de correção de Holm-Bonferroni, a fim de controlar o erro do **Tipo I** (Falso Negativo). O Teste t de Student foi aplicado para comparações par a par entre os tratamentos, com o objetivo de verificar diferenças significativas entre aqueles expostos à solução pura (sem alteração) e à solução aquecida provenientes de diferentes doadores. Para garantir que os resultados não fossem influenciados diretamente pelos efeitos do estresse salino, o tratamento PS (plantas cultivadas diretamente sob salinidade) não foi incluído nas análises comparativas gerais entre os demais tratamentos. Isso porque o foco do estudo é avaliar os efeitos causados pelo contato com o meio hidropônico de plantas sob salinidade para determinar se houve compartilhamento de informações químicas, e não o impacto direto da salinidade no próprio tratamento. Assim, o tratamento PS foi utilizado apenas na Análise de Componentes Principais (PCA) e no Teste t , com o objetivo de servir como referência para os efeitos fisiológicos típicos da salinidade. Em todas as análises os tratamentos foram assumidos como variáveis categóricas explicativas (Fatores), enquanto as demais incluídas como variáveis resposta (dependentes). Todos os gráficos e análises estatísticas ocorreram no software R (R

5. RESULTADOS

5.1 Análise de componentes principais entre variáveis fisiológicas e bioquímicas

Os componentes principais (Dim1 e Dim2) explicaram, respectivamente, 31% e 21,6% da variância total, totalizando 52,6% da variação nos dados (Figura 2). O Dim1 conteve principalmente parâmetros fisiológicos, como assimilação de CO₂, transpiração (E), condutância estomática (gs) e dentre outros. Com exceção do controle e do tratamento em salinidade (PS) que apresentaram distribuição ao longo das dimensões da PCA, grande parte dos tratamentos se agruparam na Dim1.

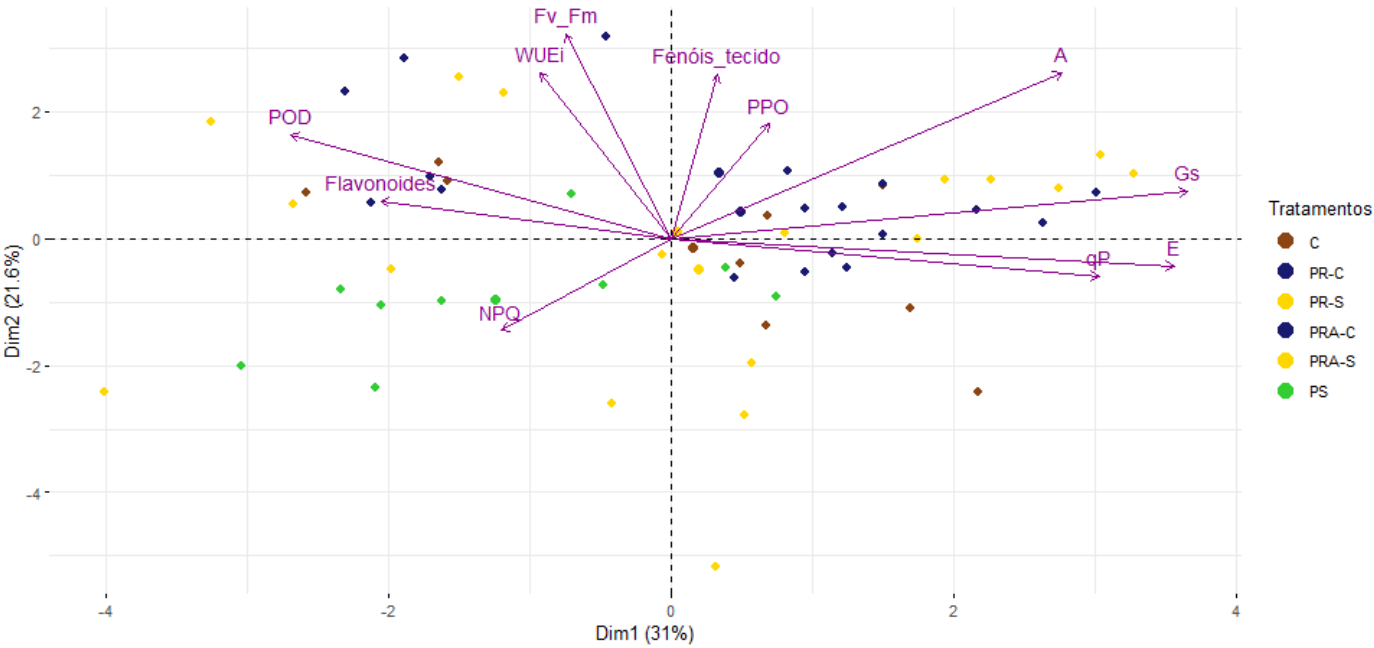


Figura 2 - Gráfico PCA de variáveis fisiológicas e bioquímicas relacionando todos os tratamentos. (Quenching fotoquímico, qP; Quenching não-fotoquímico, NPQ; Transpiração, E; Condutância estomática, Gs; Peroxidase, POD; Polifenoloxidase, PPO; Eficiência intrínseca do uso da água, WUEi; Eficiência máxima do PSII, Fv_Fm; Plantas receptoras, PR; Plantas receptoras alteradas, PRA; Controle, C)

5.2 Teor total de fenólicos exsudados no meio hidropônico

O conteúdo total de fenólicos no meio nutritivo exibiu diferença significativa apenas nos tratamentos que tiveram contato com o material coletado de plantas ausentes de sal (Figura 3). O tratamento que teve contato com o coletado puro das ausentes (PR-C) diferiu do C após 10 (chi-squared = 5.77; p = 0.05) e 15 dias (chi-squared = 5.79; p = 0.04). Depois de 20 dias (chi-squared = 6.32; p = 0.04), 25 dias (chi-squared = 7.20; p =

0.02) e 30 dias ($\chi^2 = 6.85$; $p = 0.03$) os tratamentos PR-C e PRA-C, correspondente ao tratamento que teve contato com a coletado que foi previamente aquecido advindo das ausentes, apresentaram diferenças entre si.

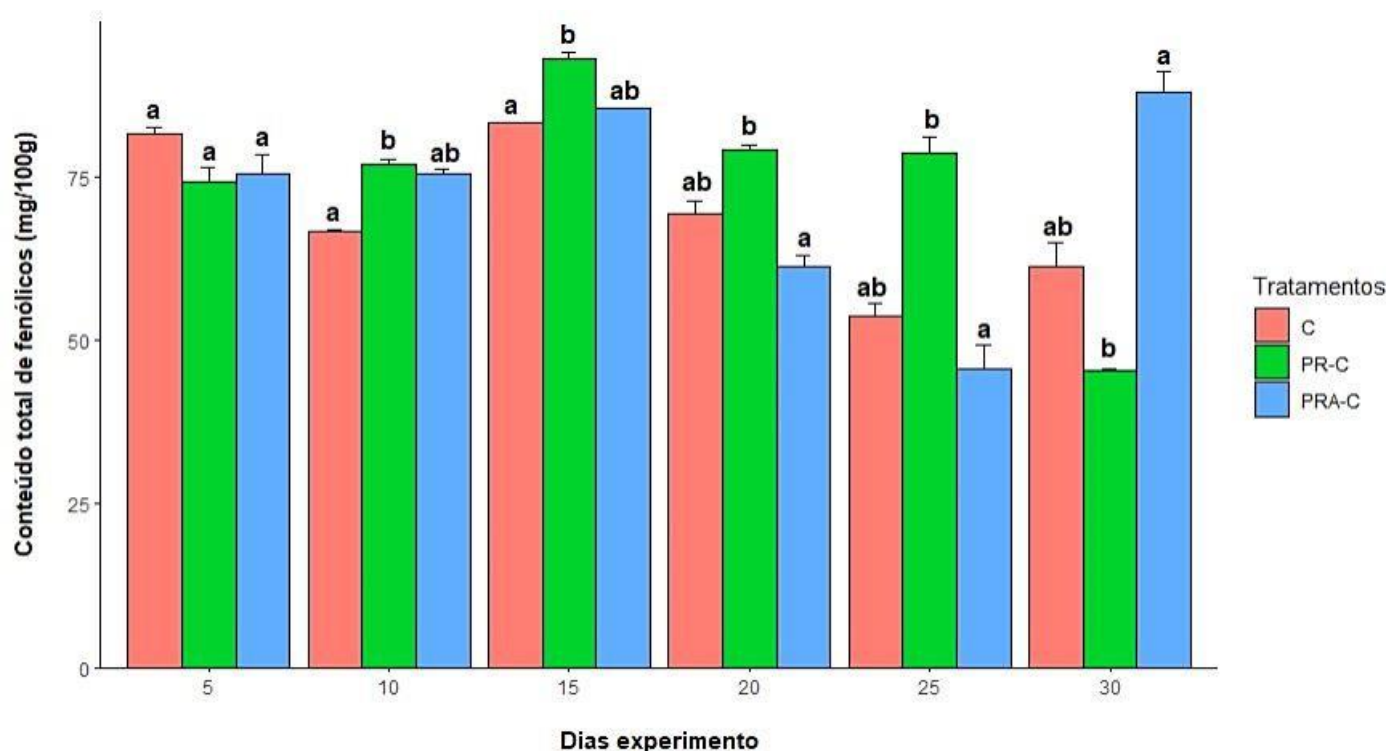


Figura 3 - Conteúdo total de fenólicos presente no meio de crescimento hidropônico (Hoagland) dos tratamentos em cada experimento no período de 30 dias ($n = 3$). Letras iguais indicam tratamentos sem diferenças significativas ($P > 0.05$), enquanto tratamentos com letras diferentes indicam diferenças significativas ($P < 0.05$) de acordo com o teste *pós-hoc* de Dunn. (Plantas receptivas, PR; Plantas receptivas alteradas, PRA; Controle, C)

5.3 Teor total de fenólicos no tecido radicular

A quantidade de fenólicos no tecido variou em todos os tratamentos e em todos os tempos avaliados independente se o tratamento teve contato com o coletado de plantas em salinidade ou do ausente do fator estressor (Figura 4). Em plantas que tiveram contato com o coletado daquelas em salinidade, o tratamento PRA-S teve diferenças com o controle aos 5 dias ($\chi^2 = 5.79$; $p = 0.04$), logo depois foi PR-S que variou dos demais aos 20 dias ($\chi^2 = 5.60$; $p = 0.04$) e após 30 dias o mesmo tratamento diferiu somente do PRA-S ($\chi^2 = 6.87$; $p = 0.03$). Diferenças entre os tratamentos que tiveram contato com o coletado das ausentes do estressor também ocorreram, sendo no tempo de 5 dias entre os tratamentos C e PRA-C ($\chi^2 = 7.20$; $p = 0.02$), em 20 dias entre C e PR-C ($\chi^2 = 6.54$; $p = 0.03$) e no último dia entre PRA-C e PR-C ($\chi^2 = 7.20$; $p = 0.02$).

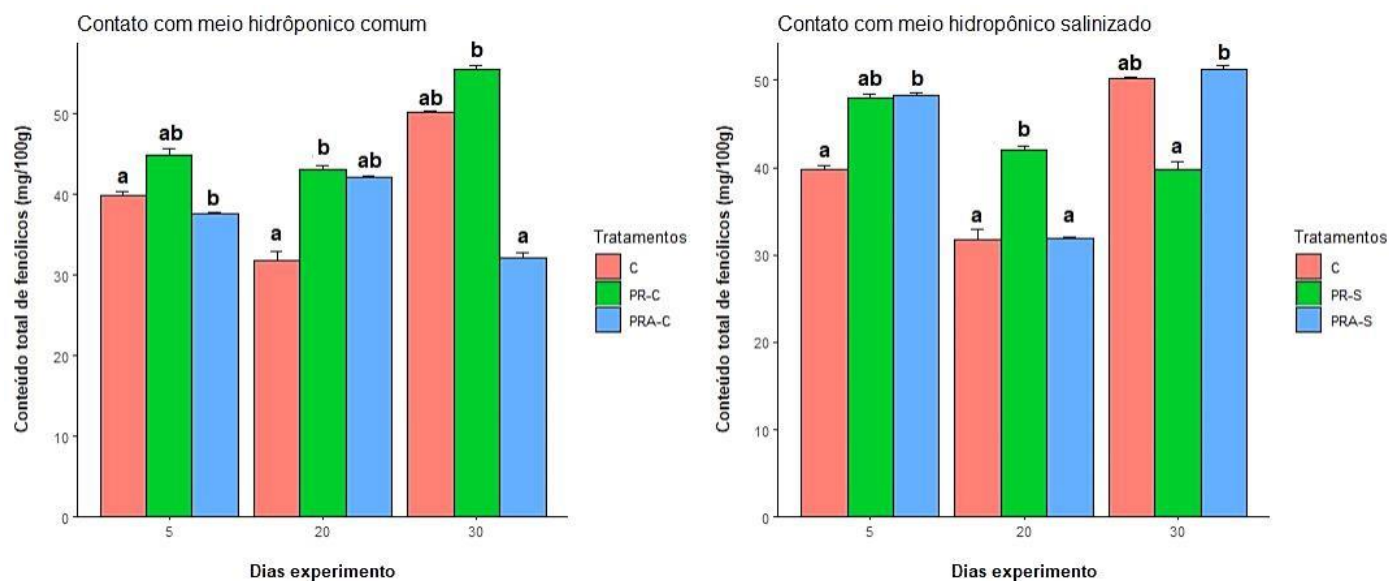


Figura 4 - Conteúdo total de fenólicos presentes no tecido radicular dos indivíduos em cada experimento durante o tempo de 5, 20 e 30 dias ($n = 3$). Letras iguais indicam tratamentos sem diferenças significativas ($P > 0.05$), enquanto tratamentos com letras diferentes indicam diferenças significativas ($P < 0.05$) de acordo com o teste *pós-hoc* de Dunn. (*Plantas receptoras*, PR; *Plantas receptoras alteradas*, PRA; *Controle*, C)

5.4 Flavonoides totais no tecido radicular

A quantidade de flavonoides no tecido radicular variou em todos os tratamentos, porém apenas no tempo de 5 e 20 dias, independente se o tratamento teve contato com a solução salina ou a ausente (Figura 5). Nas plantas em contato com o coletado proveniente de doadores sob salinidade, o tratamento PR-S teve diferenças entre o PRA-S no período de 5 dias (chi-squared = 5.35; $p = 0.04$) e em 20 dias a variação foi entre PR-S e C (chi-squared = 5.40; $p = 0.04$). Diferenças entre os tratamentos que tiveram contato com a solução ausente de sal também ocorreram, sendo em 5 dias entre os tratamentos C e PR-C (chi-squared = 4.95; $p = 0.03$) e em 20 dias entre PRA-C e PR-C (chi-squared = 6.50; $p = 0.03$).

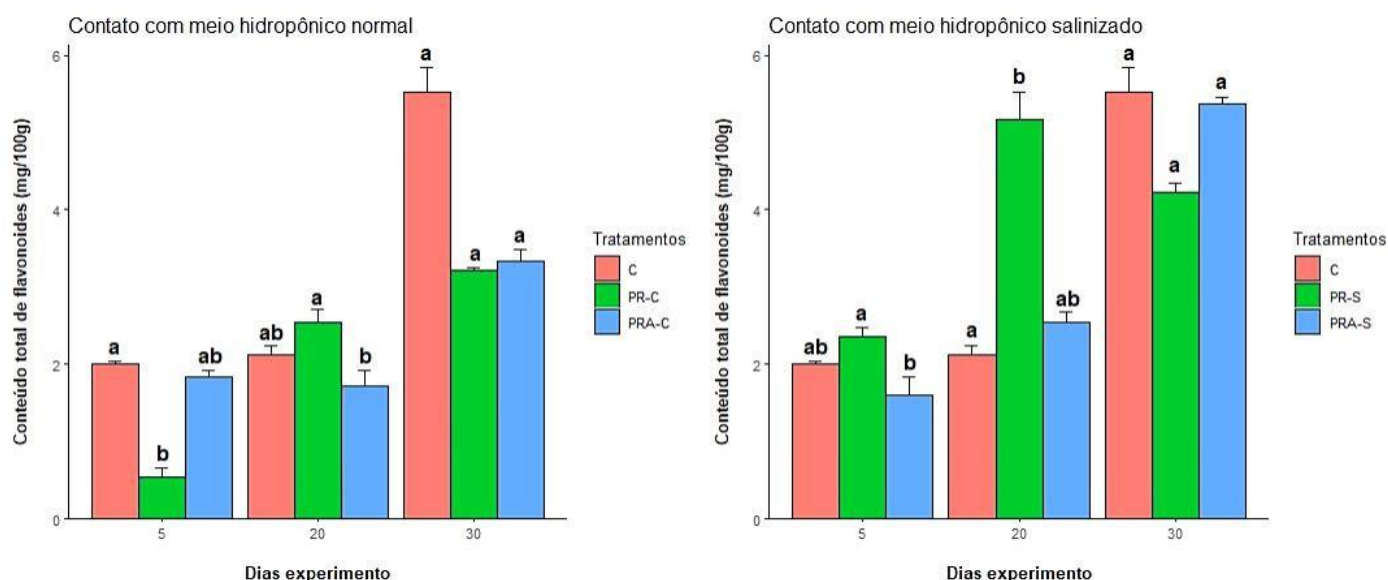


Figura 5 - Conteúdo total de flavonoides presentes nas raízes dos indivíduos em cada experimento durante o tempo de 5, 20 e 30 dias ($n = 3$). Letras iguais indicam tratamentos sem diferenças significativas ($P > 0.05$), enquanto tratamentos com letras diferentes indicam diferenças significativas ($P < 0.05$) de acordo com o teste *pós-hoc* de Dunn. (*Plantas receptivas*, PR; *Plantas receptivas alteradas*, PRA; *Controle*, C)

5.5 Atividade enzimática da POD e PPO nas raízes

As atividades enzimáticas em todos os tratamentos apresentaram variação ao longo do período experimental (Figura 6). Os tratamentos que tiveram contato com a coletado vindo de plantas em salinidade demonstraram variação na atividade da POD em 5 dias (chi-squared = 17.53; $p < 0.01$), o tratamento PRA-S diferiu dos demais após 20 dias (chi-squared = 10.84; $p < 0.01$) e 30 dias (chi-squared = 9.09; $p = 0.01$). Em relação a PPO, ainda no mesmo grupo de tratamentos, o controle variou do PRA-S após 5 dias (chi-squared = 6.44; $p = 0.03$), o PR-S variou dos demais após 20 dias (chi-squared = 13.63; $p < 0.01$) e o PRA-S do PR-S após 30 dias (chi-squared = 7.52; $p = 0.02$).

Observando os tratamentos que tiveram contato com o coletado oriundo de plantas ausentes do estressor, notamos que a atividade da POD nas raízes após 5 dias variou apenas no PRA-C (chi-squared = 12.78; $p < 0.01$), após 20 dias variou entre todos os tratamentos (chi-squared = 20.40; $p < 0.01$) e após 30 dias apenas entre os outros grupos com o controle (chi-squared = 8.78; $p = 0.01$). Na atividade da PPO nesses mesmos grupos, houve apenas variação após 5 dias entre o PRA-C e os demais (chi-squared = 6.81; $p = 0.03$) e após 30 dias entre o C e os restantes (chi-squared = 13.61; $p < 0.01$).

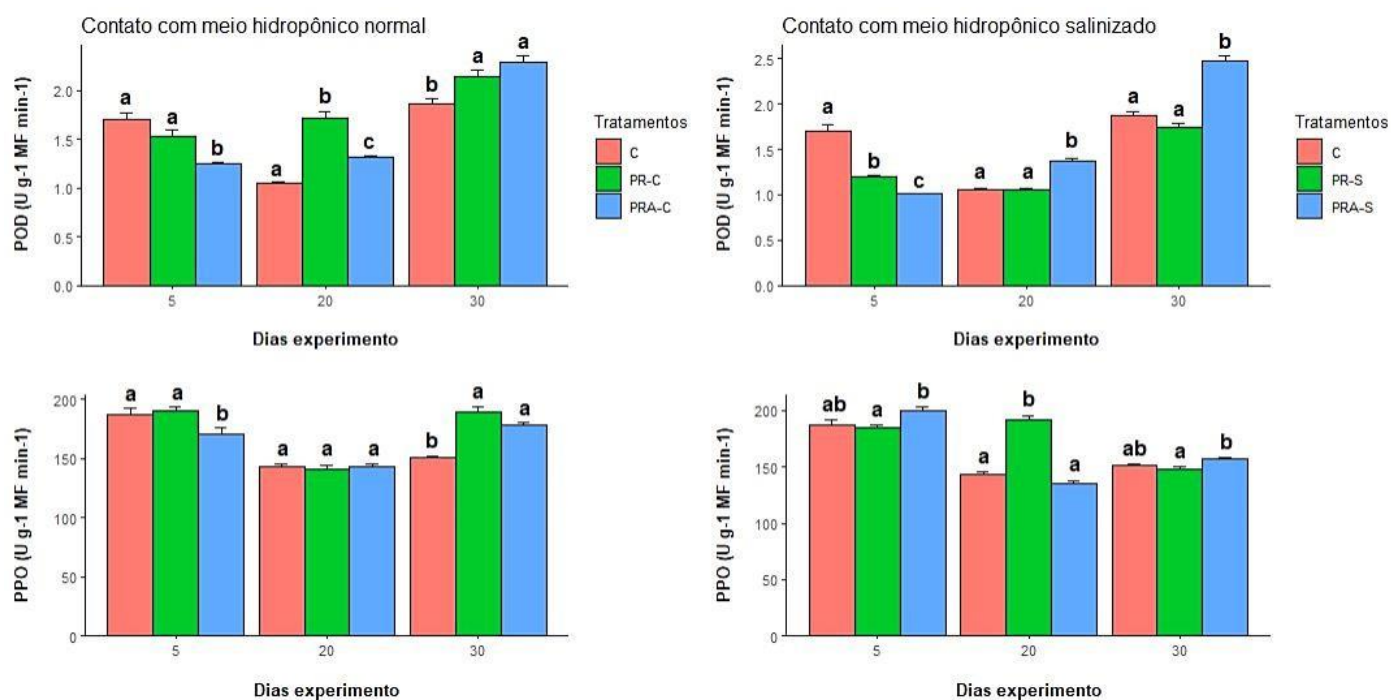


Figura 6 - Atividade enzimática da *peroxidase* (POD) e da *polifenoloxidase* (PPO) nas raízes dos indivíduos em cada experimento durante o tempo de 5, 20 e 30 dias ($n = 3$). Letras iguais indicam tratamentos sem diferenças significativas ($P > 0.05$), enquanto tratamentos com letras diferentes indicam diferenças significativas ($P < 0.05$) de acordo com o teste *pós-hoc* de Dunn. (*Plantas receptivas*, PR; *Plantas receptivas alteradas*, PRA; *Controle*, C)

5.6 Fluorescência da clorofila a

Apenas os tratamentos que tiveram contato com o coletado de plantas ausentes de salinidade apresentaram diferenças nos parâmetros fotossintéticos, sendo o único que diferiu entre os grupos o *quenching* fotoquímico (Figura 7). A variação nesse parâmetro ocorreu apenas no primeiro contato, após 5 dias os tratamentos diferiram do controle (chi-squared = 6.50; $p = 0.03$).

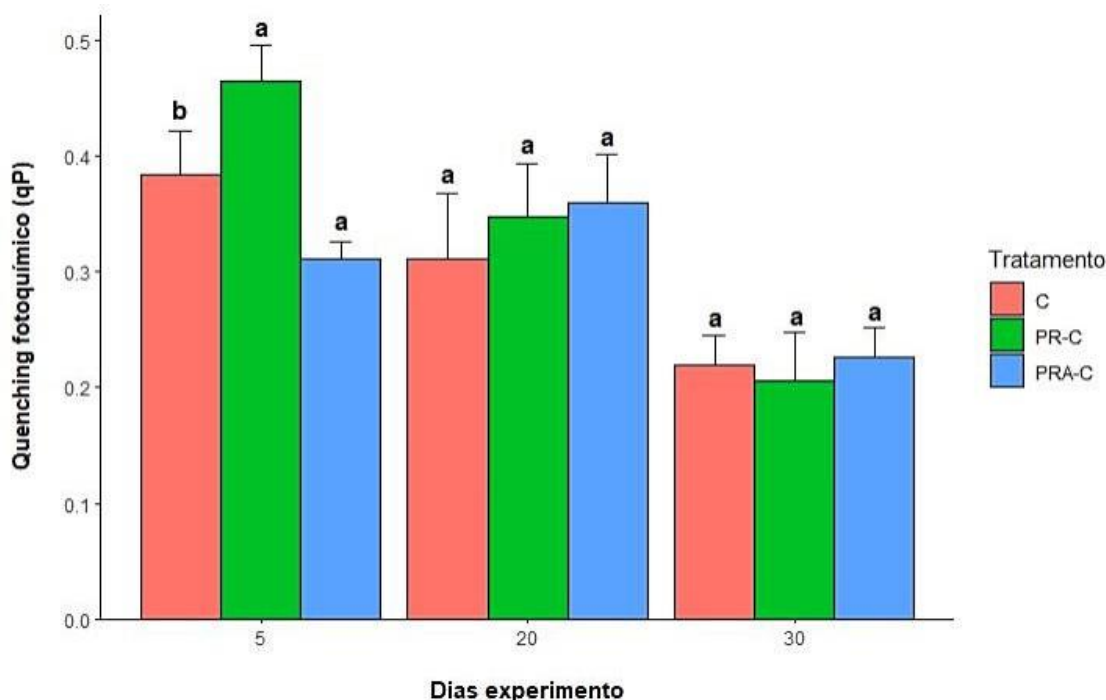


Figura 7 - Variação do *quenching* fotoquímico nos tratamentos durante o tempo de 5, 20 e 30 dias de experimentação ($n = 4$). Letras iguais indicam tratamentos sem diferenças significativas ($P > 0.05$), enquanto tratamentos com letras diferentes indicam diferenças significativas ($P < 0.05$) de acordo com o teste *pós-hoc* de Dunn. (Plantas receptivas, PR; Plantas receptivas alteradas, PRA; Controle, C)

5.7 Relação entre tratamentos em contato com meios hidropônicos distintos

Nas análises par a par com teste *t*, todos os tratamentos demonstraram diferenças em certos parâmetros entre si, principalmente em relação à atividade enzimática (Tabela 1). O controle e as plantas em salinidade (PS) exibiram variação na transpiração e no *quenching* não-fotoquímico no tempo de 20 dias. As plantas que receberam o coletado puro advindo das ausentes do estressor (PR-C) e as outras que receberam das PS tiveram mudanças na sua assimilação de carbono e transpiração no tempo de 20 e 30 dias, respectivamente. Os tratamentos PRA-C e PRA-S divergiram em todos os parâmetros mostrados na tabela, com a maioria sendo no tempo de 5 dias e somente a assimilação de carbono no período de 20 dias.

Em relação à atividade enzimática da POD, o controle e as plantas em salinidade tiveram diferenças no período de 5, 20 e 30 dias. Os tratamentos que tiveram contato com o coletado puro de seus vizinhos (PR-C e PR-S) exibiram diferenças na atividade da POD durante o tempo de 5, 20 e 30 dias. Diferindo dos anteriores, os tratamentos PRA-C e PRA-S apenas diferiram entre si no tempo de 5 dias. A atividade enzimática da PPO entre o controle e PS teve diferenças significativas apenas no período de 20 e 30 dias. Análogo ao ocorrido entre os tratamentos anteriores, PR-C e PR-S também divergiram somente no período de 20 e 30 dias. Por fim, os tratamentos PRA-C e PRA-S tiveram mudanças em todo o período de 5, 20 e 30 dias.

Parâmetros	Controle X PS			PR-C X PR-S			PRA-C X PRA-S		
	5 dias	20 dias	30 dias	5 dias	20 dias	30 dias	5 dias	20 dias	30 dias
A	0.28	0.38	0.31	0.22	0.04*	0.45	0.48	0.01*	0.07
E	0.12	0.04*	0.27	0.06	0.12	0.04*	0.04*	0.21	0.58
qP	0.26	0.92	0.06	0.08	0.09	0.41	< 0.01*	0.90	0.95
NPQ	0.35	0.05*	0.28	0.28	0.82	0.96	0.02*	0.21	0.18
PPO	0.08	< 0.01*	< 0.01*	0.78	< 0.01*	< 0.01*	0.02*	0.02*	< 0.01*
POD	<0.01*	< 0.01*	< 0.01*	<0.01*	< 0.01*	< 0.01*	< 0.01*	0.11	0.08

Tabela 1 - Análise par a par entre os tratamentos que receberam soluções de fontes diferentes. “*” representam os tratamentos com diferenças estatísticas significativas, enquanto o símbolo “<” indica que foram valores muito pequenos e foram simplificados para “< 0.01”. Os valores de p exibidos na tabela são aqueles correspondentes ao fornecido pelo teste t. (Assimilação de carbono, A; Quenching fotoquímico, qP; Quenching não-fotoquímico, NPQ; Transpiração, E; Peroxidase, POD; Polifenoloxidase, PPO; Plantas receptivas, PR; Plantas receptivas alteradas, PRA)

6. DISCUSSÃO

O sistema radicular é um órgão sensível a alterações no ambiente, especialmente às mudanças químicas induzidas por outras plantas (Howard *et al.*, 2022). O tratamento PR-C, referente ao que recebeu o coletado puro ausente de sal, apresentou alterações na exsudação e quantidade de fenólicos em seu tecido radicular durante o tempo de exposição. Em contraste, o grupo PRA-C em contato com o coletado ausente de sal e previamente aquecido, não demonstrou alterações significativas nos exsudatos em relação aos demais tratamentos, porém os fenólicos no tecido radicular diferem tanto do controle quanto do PR-C. Como todas as moléculas orgânicas, os fenólicos possuem faixas de temperatura que possibilitam seu funcionamento e apesar da temperatura de 60°C não ser suficiente para a completa eliminação de certos grupos, outros podem ter sua quantidade reduzida (Castro *et al.*, 2017). O estudo de Biedrzycki *et al.* (2010) com hidroponia demonstrou que plantas expostas a um meio previamente ocupado por outra planta livre de estressores apresentaram alterações no funcionamento do seu sistema radicular. Contudo, essas mudanças não ocorreram quando o meio de crescimento da planta anterior foi tratado com um inibidor de exsudação. Esses resultados destacam o papel dos infoquímicos liberados por raízes saudáveis no ambiente rizosférico, os quais podem ser acessados por outras plantas e modular seu comportamento. As variações nos exsudatos fenólicos e na concentração de fenólicos no tecido foram mais evidentes no tratamento PR-C em comparação ao tratamento PRA-C devido às alterações nos compostos fenólicos do meio coletado após o processo de aquecimento.

A salinidade afeta primeiramente o sistema radicular, induzindo a planta a

realizar ajustes fisiológicos para conseguir captar água e nutrientes do solo (Hasan *et al.*, 2018). Esses ajustes fisiológicos estimulam a produção de substâncias diferentes daquelas encontradas nos tecidos ou liberadas no ambiente em condições normais, mudando a dinâmica da rizosfera e dos organismos próximos (Hiremath *et al.*, 2024). Nos tratamentos expostos ao coletado oriundo do meio salinizado, não foram observadas alterações nos fenólicos exsudados, embora houve mudanças na concentração no tecido radicular. O tratamento PRA-S, exposto ao coletado anteriormente aquecido e proveniente de plantas sob salinidade, demonstrou considerável variação nos fenólicos em seu tecido radicular em relação ao controle e ao PR-S. Conforme mencionado, plantas sob estresse salino ajustam o funcionamento de seu sistema radicular, resultando em alterações no perfil de compostos exsudados e dos presentes no tecido. Esse mecanismo explica as mudanças observadas neste trabalho no tratamento PRA-S, que mesmo após o aquecimento do material coletado e seu posterior contato, teve alterações mais evidentes daquelas apresentadas pelo tratamento PR-S.

O contato com a coletado de plantas sem o estressor, tanto no tratamento que recebia puro quanto aquecido, diminuiu a quantidade de flavonoides no tecido radicular no intervalo de 5 a 20 dias, principalmente do tratamento PR-C no primeiro contato e do PRA-C no decorrer do tempo. As plantas em contato com o coletado oriundo do meio em salinidade também exibiram padrões semelhantes, todavia o tratamento PR-S aumentou a quantidade de flavonoides aos 20 dias. Sabe-se atualmente que os flavonoides além de funções defensivas como filtrados UV, repelentes de herbívoros e contra danos oxidativos, são também de extrema importância na comunicação com microrganismos e sua sincronização com as necessidades do vegetal (Nascimento; Tattini, 2022). Por conta de suas funções com a microbiota da rizosfera, é cogitado que os flavonoides sejam as principais moléculas dentre os fenólicos que plantas vizinhas tenham contato e que utilizem como fonte de informação a respeito do estado fisiológico das demais do seu entorno (Kessler; Kalske, 2018). Com base nos resultados, o aumento de flavonoides no tratamento PR-S pode refletir um mecanismo adaptativo que foi desencadeado pela percepção de sinais químicos provenientes das plantas previamente expostas à salinidade. O ocorrido pode ser interpretado como uma preparação fisiológica preventiva, com a planta ajustando seu metabolismo em antecipação a dificuldades similares.

Dentre os efeitos específicos de cada agente estressor nos vegetais, o aumento de espécies reativas de oxigênio acontece rotineiramente como resultado do desbalanço fisiológico da planta (Vineeth *et al.*, 2023). Neste estudo, os tratamentos demonstraram alterações na atividade da POD e PPO, enzimas que atuam na limpeza

de espécies reativas em excesso, durante todo o período experimental. Apesar de todos os tratamentos apresentarem alterações em suas enzimas antioxidantes, a atividade da POD e PPO nos indivíduos que tiveram contato com o coletado de plantas sem salinidade exibiram padrões muito similares. Em contraste, os tratamentos que tiveram contato com o coletado de plantas em salinidade apresentaram variação mais acentuada da atividade da POD e PPO entre si, principalmente o tratamento PRA-S. É amplamente conhecido que o estresse salino contribui significativamente para o aumento da atividade de diversos grupos de enzimas antioxidantes, bem como de enzimas envolvidas na síntese de compostos fenólicos, que também desempenham papéis na eliminação de EROs (Muhammad *et al.*, 2024). Ambos os tratamentos apresentaram aumento dos fenólicos em seus tecidos radiculares e, no caso daqueles em contato com o coletado de plantas ausentes de sal, ocorreu também aumento na exsudação e que pode ter levado ao aumento de EROs, pois a síntese de fenólicos gera subprodutos oxidativos, culminando em maior atividade das enzimas antioxidante.

Existem situações onde fenólicos podem ser absorvidas pelas folhas, no caso dos voláteis, quanto pelas raízes, sendo posteriormente transportados para a parte aérea, onde podem causar distúrbios, incluindo alterações nos *quenchings* (Meets; Mithöfer, 2020; Effah *et al.*, 2019). No presente estudo, os únicos tratamentos afetados foram aqueles expostos ao coletado advindo de plantas ausentes de sal, os quais apresentaram alterações no *quenching* fotoquímico somente após cinco dias do primeiro contato. O *quenching* fotoquímico, relacionado à perda de energia luminosa na forma de fluorescência, é intensificado em resposta ao aumento sistêmico de espécies reativas de oxigênio no organismo vegetal (Han *et al.*, 2021). No trabalho de Kong *et al.* (2018), é levantada a possibilidade da existência de compostos que podem atuar especificamente na comunicação entre plantas e que, a depender da espécie, são o primeiro passo no reconhecimento e desencadeamento de respostas inibitórias (alelopatia). Em interações alelopáticas, os *quenchings* são uma ferramenta bastante utilizada para determinar se a planta de fato sofreu danos ao interagir com outra. As alterações nos dois tratamentos PR-C e PRA-C em relação ao controle demonstra que os fenólicos atingiram a parte aérea e ocasionou perturbações no *quenching* fotoquímico, todavia esse acontecimento não é estritamente associado a uma interação negativa ou inibitória, mas como um ajuste metabólico inicial ao primeiro contato com outros vegetais.

Nas análises par a par com teste t, ficou claro os efeitos negativos da salinidade no tratamento PS em relação ao controle, visto que a transpiração e o *quenching* não-fotoquímico possuíram diferenças. Esses efeitos são comumente observados em plantas expostas a ambientes salinos e estão associados, principalmente, à ação dos

íons sódio (Na^+) (Islam *et al.*, 2024). O Na^+ transportado até as folhas pode desregular a abertura estomática ao competir com os íons cálcio (Ca^{2+}), além de dificultar o movimento de água nos espaços celulares, como as câmaras subestomáticas (Hu *et al.*, 2022). Por outro lado, os íons cloro (Cl^-) afetam diretamente processos fisiológicos, particularmente a fotossíntese, devido à sua tendência de se acumular nos tilacoides e limitar o crescimento vegetal (Vineeth *et al.*, 2023; Christoph-Martin *et al.*, 2018). Os outros tratamentos comparados par a par também exibiram diferenças entre si, com destaque para os tratamentos PRA-C e PRA-S que diferiram em todos os parâmetros listados na tabela 1, reafirmando o quanto o aquecimento produz diferenças significativas nas moléculas orgânicas presentes no material coletado.

De acordo com os trabalhos de Effah *et al.* (2019), Ninkovic *et al.* (2019) e Hagiwara *et al.* (2021), a comunicação entre plantas é frequentemente associada a uma curta distância entre o emissor e o receptor, particularmente no caso de compostos orgânicos voláteis (VOCs). No presente estudo, observou-se que, desde o primeiro contato até o último dia de experimentação, as plantas apresentaram alterações nas variáveis analisadas. Esses dados sugerem que a dinâmica de interação entre plantas via exsudatos radiculares ocorre de forma rápida, possivelmente em função de dois fatores: (1) a maior concentração dos exsudados fenólicos no meio hidropônico coletado, uma vez que esses compostos não se dispersam tão facilmente quanto os VOCs e possuem maior durabilidade no ambiente; e (2) a elevada sensibilidade das raízes, que permite que mesmo pequenas quantidades de fenólicos sejam suficientes para desencadear respostas no organismo vegetal. Adicionalmente, é válido ressaltar que os tratamentos que receberam soluções previamente aquecidas apresentaram efeitos menos pronunciados em comparação aos tratamentos expostos ao coletado puro em determinados parâmetros. Esse comportamento levanta a hipótese de que certos fenólicos presentes no meio de crescimento coletado podem ter sido sensíveis a temperaturas de 60° e tiveram sua atuação comprometida.

7. CONCLUSÃO

Concluimos que plantas que receberam o material coletado de plantas ausentes de salinidade apresentaram maiores alterações em comparação com as que receberam os meios salinizados, demonstrando que os processos de comunicação vegetal promovidos por fenólicos são alterados em meio salino e quando aquecidos. Reforçamos o papel dos fenólicos na interação planta-planta e destacamos sua complexidade nas interações químicas que acontecem a todo momento na rizosfera, incentivando estudos futuros nesse campo.

REFERÊNCIAS

- AWAD, Mohamed A.; DE JAGER, Anton; VAN WESTING, Lucie M. Flavonoid and chlorogenic acid levels in apple fruit: characterisation of variation. *Scientia Horticulturae*, v. 83, n. 3, p. 249-263, 2000.
- ABEDINZADEH, Motahhareh; ETESAMI, Hassan ; ALIKHANI, Hossein Ali, Characterization of rhizosphere and endophytic bacteria from roots of maize (*Zea mays* L.) plant irrigated with wastewater with biotechnological potential in agriculture, **Biotechnology Reports**, v. 21, p. e00305, 2019.
- AL-KHAYRI, Jameel M *et al*, Plant Secondary Metabolites: The Weapons for Biotic Stress Management, **Metabolites**, v. 13, n. 6, p. 716–716, 2023.
- BIEDRZYCKI, Meredith L. *et al*, Root exudates mediate kin recognition in plants, **Communicative & Integrative Biology**, v. 3, n. 1, p. 28–35, 2010.
- CASTRO, Deise Souza de *et al*, Efeito da temperatura sobre a composição físico-química e compostos bioativos de farinha de taro obtida em leite de jorro, **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 20, n. 0, 2017.
- CHOWDHARY, Vibhakar; ALOOPARAMPIL, Sheena; V. PANDYA, Rohan; *et al*. Physiological function of phenolic compounds in plant defense system. **Phenolic Compounds - Chemistry, Synthesis, Diversity, Non-Conventional Industrial, Pharmaceutical and Therapeutic Applications**, 2022.
- CHRISTOPH-MARTIN, Geilfus. Article type: Review Title: Chloride – From Nutrient to Toxicant Short title: Cl – – From Nutrient to Toxicant. *Plant and Cell Physiology*, 2018.
- EFFAH, Evans; HOLOPAINEN, Jarmo K. ; MCCORMICK, Andrea Clavijo, Potential roles of volatile organic compounds in plant competition, **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 38, p. 58–63, 2019.
- EFFAH, Evans; SVENDSEN, Logan; BARRETT, D. Paul; *et al*. Exploring plant volatile-mediated interactions between native and introduced plants and insects. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, 2022.
- ELHAKEEM, Ali; MARKOVIC, Dimitrije; BROBERG, Anders; *et al*. Aboveground mechanical stimuli affect belowground plant-plant communication. **PLOS ONE**, v. 13, n. 5, p. e0195646, 2018.
- ERB, Matthias *et al*, Indole is an essential herbivore-induced volatile priming signal in maize, **Nature Communications**, v. 6, n. 1, 2015.
- GAO, Yingzhi ; LYNCH, Jonathan P., Reduced crown root number improves water acquisition under water deficit stress in maize (*Zea mays*L.), **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n. 15, p. 4545–4557, 2016.
- GFELLER, Valentin *et al*, Root volatiles in plant–plant interactions I: High root sesquiterpene release is associated with increased germination and growth of plant neighbours, **Plant, Cell & Environment**, v. 42, n. 6, p. 1950–1963, 2019.

GLINWOOD, Robert ; BLANDE, James D., Deciphering Chemical Language of Plant Communication: Synthesis and Future Research Directions, **Signaling and Communication in Plants**, p. 319–326, 2016.

HAGIWARA, Tomika *et al*, Effective distance of volatile cues for plant–plant communication in beech, **Ecology and Evolution**, v. 11, n. 18, p. 12445–12452, 2021.

HAGIWARA, Tomika ; SHIOJIRI, Kaori, Within-plant signaling via volatiles in beech (*Fagus crenata* Blume), **Journal of Plant Interactions**, v. 15, n. 1, p. 50–53, 2020.

HAN, Jimei *et al*, The roles of photochemical and non-photochemical quenching in regulating photosynthesis depend on the phases of fluctuating light conditions, **Tree Physiology**, 2021.

HASAN, R; KAWASAKI, M; TANIGUCHI, M; *et al*. The damage of root, leaf and chloroplast ultrastructure on maize seedlings caused by salinity stress. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 197, p. 012054, 2018.

HEUERMAN, Diana; DÖLL, Stefanie; DÖRTE SCHWENEKER; *et al*. Distinct metabolite classes in root exudates are indicative for field- or hydroponically-grown cover crops. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023.

HIREMATH, Shivanand S *et al*, A Review on Role of Root Exudates in Shaping Plant-Microbe-Pathogen Interactions, **Journal of Advances in Microbiology**, v. 24, n. 12, p. 1–17, 2024.

HOAGLAND, D ; ARNON, D. **CALIFORNIA AGRICULTURAL EXPERIMENT STATION The Water-Culture Method for Growing Plants without Soil**. [s.l.: s.n.], 1950.

HOWARD, Mia M. *et al*, Integrating plant-to-plant communication and rhizosphere microbial dynamics: ecological and evolutionary implications and a call for experimental rigor, **The ISME Journal**, 2021.

HOWARD, Mia M.; BASS, Ethan; CHAUTÁ, Alexander; *et al*. Integrating plant-to-plant communication and rhizosphere microbial dynamics: ecological and evolutionary implications and a call for experimental rigor. **The ISME Journal**, 2021.

HU, Dandan *et al*, Maize (*Zea mays* L.) responses to salt stress in terms of root anatomy, respiration and antioxidative enzyme activity, **BMC Plant Biology**, v. 22, n. 1, 2022.

ISLAM, MOHAMMAD SOHIDUL; MD RAFIQU, ISLAM; MD KAMRUL HASAN; *et al*. Salinity Stress in Maize: Consequences, Tolerance Mechanisms, and Management Strategies. **OBM genetics**, v. 08, n. 02, p. 1–41, 2024.

KAR, Manoranjan; MISHRA, Dinabandhu. Catalase, peroxidase, and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence. **Plant physiology**, v. 57, n. 2, p. 315–319, 1976.

KARBAN, Richard; GROF-TISZA, Patrick ; BLANDE, James D. CHEMOTYPIC Variation in Volatiles and Herbivory for Sagebrush. **Journal of Chemical Ecology**, v. 42, n. 8, p. 829–840, 2016.

KESSLER, André ; KALSKE, Aino. Plant Secondary Metabolite Diversity and Species Interactions. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 49, n. 1, p. 115–138, 2018.

- KHANAM, Mehrun Nisha; ANIS, Mohammad; JAVED, Saad Bin; *et al.* Adventitious Root Culture—An Alternative Strategy for Secondary Metabolite Production: A Review. **Agronomy**, v. 12, n. 5, p. 1178, 2022.
- KONG, Chui-Hua *et al.* Plant neighbor detection and allelochemical response are driven by root-secreted signaling chemicals, **Nature Communications**, v. 9, n. 1, 2018.
- KUMAR PARIDA, Pradosh ; DEB, Arindam. Recent Approaches In Agriculture (Volume - 1). **Integrated Publications eBooks**, v. 1, n. 978-93-95118-83-5, 2023.
- KUMAR, Santosh; ABEDIN, Md. Minhajul; SINGH, Ashish Kumar; *et al.* Role of phenolic compounds in plant-defensive mechanisms. **Plant Phenolics in Sustainable Agriculture**, p. 517–532, 2020.
- LANDI, Marco. Airborne signals and abiotic factors: the neglected side of the plant communication. **Communicative & Integrative Biology**, v. 13, n. 1, p. 67–73, 2020.
- LIMA, Giuseppina Pace Pereira; BRASIL, Oswaldo Galvão; OLIVEIRA, Antonio Marinho de. Polyamines and peroxidase activity in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grown under saline stress. **Scientia Agricola**, v. 56, n. 1, p. 21-26, 1999.
- MARKOVIC, Dimitrije; COLZI, Ilaria; TAITI, Cosimo; *et al.* Airborne signals synchronize the defenses of neighboring plants in response to touch. **Journal of Experimental Botany**, v. 70, n. 2, p. 691–700, 2018.
- MARKOVIC, Dimitrije *et al.* Plant Responses to Brief Touching: A Mechanism for Early Neighbour Detection?, **PLOS ONE**, v. 11, n. 11, p. e0165742, 2016.
- MAXWELL, Kate ; JOHNSON, Giles N. Chlorophyll fluorescence—a practical guide. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, n. 345, p. 659–668, 2000.
- MEENTS, Anja K. ; MITHÖFER, Axel. Plant–Plant communication: Is there a role for volatile damage-associated molecular patterns? **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 2020.
- MUHAMMAD, AIZAZ; ULLAH, Raza; ULLAH, Tariq; *et al.* Insights into physiological and biochemical responses of *Zea mays* L. under salinity stress. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, v. 36, p. 1–13, 2024.
- MURCHIE, E.H. ; LAWSON, T. Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications. **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 13, p. 3983–3998, 2013.
- MUSHTAQ, Waseem; SIDDIQUI, M B ; KHALID REHMAN HAKEEM. **Allelopathy**. [s.l.]:Springer Cham, 2020.
- NASCIMENTO, Luana Beatriz dos Santos ; TATTINI, Massimiliano, Beyond Photoprotection: The Multifarious Roles of Flavonoids in Plant Terrestrialization, **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 9, p. 5284, 2022.
- NINKOVIC, Velemir *et al.* Who is my neighbor? Volatile cues in plant interactions, **Plant Signaling & Behavior**, v. 14, n. 9, p. 1634993, 2019.
- PANDOLFI, Camilla *et al.* Acclimation improves salt stress tolerance in *Zea mays*

plants, **Journal of Plant Physiology**, v. 201, p. 1–8, 2016.

RAHMAN, Md Mezanur *et al*, Adaptive Mechanisms of Halophytes and Their Potential in Improving Salinity Tolerance in Plants, **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 19, p. 10733, 2021.

RODRÍGUEZ-CALZADA, Tania; QIAN, Minjie; STRID, Åke; *et al*. Effect of UV-B radiation on morphology, phenolic compound production, gene expression, and subsequent drought stress responses in chili pepper (*Capsicum annuum* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 134, p. 94–102, 2019.

R Core Team (2024). *_R: A Language and Environment for Statistical Computing_*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

SANTOS, Heidy *et al*, Indirect plant defenses: volatile organic compounds and extrafloral nectar, **Anthropod-plant interactions**, 2021.

SATO, Miori *et al*, Self-discrimination in vine tendrils of different plant families, **Plant Signaling & Behavior**, v. 13, n. 4, p. e1451710, 2018.

SHIOJIRI, Kaori; KARBAN, Richard ; ISHIZAKI, Satomi, Prolonged exposure is required for communication in sagebrush, **Arthropod-Plant Interactions**, v. 6, n. 2, p. 197–202, 2012.

SHUKRY, Wafaa; BAYERLI, Roula ; BAYERLY, Rola. Effects of Different Concentrations of NaCl On Seedling Growth and Physiological Responses in Four Varieties of *Zea mays* L. Prof, **Jordan Journal of Agricultural Sciences**, v. 11, n. 3, 2015.

SONG, Geun Cheol ; RYU, Choong-Min. Evidence for volatile memory in plants: Boosting defence priming through the recurrent application of plant volatiles. **PubMed**, v. 41, n. 8, p. 724–732, 2018.

SINGLETON, Vernon L.; ORTHOFER, Rudolf; LAMUELA-RAVENTÓS, Rosa M. [14] Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. **Methods in enzymology**, v. 299, p. 152-178, 1999.

STEFANOV, Martin A *et al*, Changes in Photosystem II Complex and Physiological Activities in Pea and Maize Plants in Response to Salt Stress, **Plants**, v. 13, n. 7, p. 1025–1025, 2024.

T.V. VINEETH *et al*, Photosynthetic machinery under salinity stress: Trepidations and adaptive mechanisms, **PHOTOSYNTHETICA**, v. 61, n. 1, p. 73–93, 2023.

TAKAHASHI, Yuta; SHIOJIRI, Kaori ; YAMAWO, Akira. Aboveground plant-to-plant communication reduces root nodule symbiosis and soil nutrient concentrations. **Scientific reports**, v. 11, n. 1, p. 12675, 2021.

WANG, Lei *et al*, Reclamation of saline soil by planting annual euhalophyte *Suaeda salsa* with drip irrigation: A three-year field experiment in arid northwestern China, **Ecological Engineering**, v. 159, p. 106090, 2021.

YAMASHITA, Felipe; RODRIGUES, Angélica Lino; RODRIGUES, Tatiane Maria; *et al*. Potential plant–plant communication induced by infochemical methyl jasmonate in Sorghum (*Sorghum bicolor*). **Plants**, v. 10, n. 3, p. 485, 2021.

YANG, Rong *et al*, Salinity changes root occupancy by arbuscular mycorrhizal fungal species, **Pedobiologia**, v. 81-82, p. 150665–150665, 2020.

YAMAWO, Akira; HAGIWARA TOMIKA; YOSHIDA, Satomi; *et al*. Evolutionary relations between mycorrhizal symbiosis and plant–plant communication in trees. **bioRxiv (Cold Spring Harbor Laboratory)**, 2022.

ZHU, Fan. Interactions between starch and phenolic compound. **Trends in Food Science & Technology**, v. 43, n. 2, p. 129–143, 2015.