



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

AMANDA NEUMANN

**CONDICIONAMENTO BIOLÓGICO DE SOLO COM
MATERIAIS COMPÓSITOS BIODEGRADÁVEIS:
INFLUÊNCIA NO CRESCIMENTO DE TOMATE, NA
ATIVIDADE MICROBIANA E NO PERFIL METABOLÔMICO
SOB DIFERENTES NÍVEIS DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA**

AMANDA NEUMANN

**CONDICIONAMENTO BIOLÓGICO DE SOLO COM
MATERIAIS COMPÓSITOS BIODEGRADÁVEIS:
INFLUÊNCIA NO CRESCIMENTO DE TOMATE, NA
ATIVIDADE MICROBIANA E NO PERFIL METABOLÔMICO
SOB DIFERENTES NÍVEIS DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA**

Trabalho de Dissertação apresentado à
Universidade Estadual de Londrina - UEL,
como requisito para a obtenção do título de
Mestre em Biotecnologia.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Martinez de
Oliveira.

Londrina
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Neumann, Amanda.

Condicionamento biológico de solo com materiais compósitos biodegradáveis: influência no crescimento de tomate, na atividade microbiana e no perfil metabolômico sob diferentes níveis de disponibilidade hídrica / Amanda Neumann. - Londrina, 2025.
80f.: il.

Orientador: André Luiz Martinez de Oliveira.

Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia, 2025.

Inclui bibliografia.

1. Metabolômica de solo - Tese. 2. Déficit hídrico - Tese. 3. Biomaterial - Tese.
I. Martinez de Oliveira, André Luiz. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia. III. Título.

CDU 66

AMANDA NEUMANN

**CONDICIONAMENTO BIOLÓGICO DE SOLO COM
MATERIAIS COMPÓSITOS BIODEGRADÁVEIS:
INFLUÊNCIA NO CRESCIMENTO DE TOMATE, NA
ATIVIDADE MICROBIANA E NO PERFIL METABOLÔMICO
SOB DIFERENTES NÍVEIS DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA**

Trabalho de Dissertação apresentado à
Universidade Estadual de Londrina - UEL,
como requisito para a obtenção do título de
Mestre em Biotecnologia.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Martinez
de Oliveira
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof^a. Dra. Elisete Pains Rodrigues
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof^a Dra. Adriana Pereira da Silva -
Rizobacter Brasil

Prof^a. Dra. Anelize Bauermeister
Instituto de Química
Universidade de São Paulo - USP

Londrina, 25 de abril de 2025.

RESUMO

NEUMANN, Amanda. **Condicionamento biológico de solo com materiais compósitos biodegradáveis**: influência no crescimento de tomate, na atividade microbiana e no perfil metabolômico sob diferentes níveis de disponibilidade hídrica. 2025. 80 p. Trabalho de Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) - Centro de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2025.

O cenário mundial de mudanças climáticas e crescimento populacional impõe sobre a agroindústria o desafio de aumentar a produtividade dos cultivos com menor impacto ambiental, priorizando práticas sustentáveis. O trabalho teve como objetivo analisar os efeitos do déficit hídrico associado ao uso de biomaterial no perfil metabolômico do solo e no desenvolvimento da planta. O experimento foi conduzido em casa de vegetação por 60 dias, adotando um delineamento com duas condições bióticas: com plantio de tomate e sem plantio de tomate; dois tipos de substrato: com adição de biomaterial e sem adição de biomaterial; e dois níveis de disponibilidade hídrica: 70% C.C. (capacidade de campo) e 50% C.C. Foram feitas análises biométricas (altura de parte aérea, comprimento de raiz e biomassa seca) para analisar o efeito no desenvolvimento vegetal, e bioquímicas (β -glicosidase, arilsulfatase, respiração basal, carbono da biomassa microbiana e quociente metabólico) que trazem informação sobre atividade microbiana no solo. Também foram feitas análises de cromatografia gasosa e espectrometria de massas (GC-MS) para a identificação de alterações no perfil metabolômico. Os resultados biométricos mostram que a presença do biomaterial teve influência positiva no desenvolvimento da planta, demonstrando aumento significativo no comprimento da parte aérea e na biomassa de parte aérea e de raiz. Os resultados obtidos nas análises bioquímicas apresentaram efeito somente da presença/ausência de planta, sem efeito significativo de biomaterial ou déficit hídrico. Os resultados de metabolômica permitiram agrupar os diferentes tratamentos com base nos perfis dos substratos, influenciados pela presença de biomateriais, níveis de disponibilidade hídrica e interação com plantas de tomate. Foram observados compostos com potencial relevância para a atividade microbiana e o desenvolvimento vegetal, sugerindo que os biomateriais podem atuar como bioinsumos, promovendo o crescimento das plantas e auxiliando na mitigação do estresse hídrico.

Palavras-chave: sustentabilidade; metabolômica; déficit hídrico; biomaterial; desenvolvimento vegetal.

ABSTRACT

NEUMANN, Amanda. **Biological soil conditioning with biodegradable composite materials:** influence on tomato growth, microbial activity and metabolomic profile under different levels of water availability. 2025. 80 p. Trabalho de Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) - Centro de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2025.

The global scenario of climate change and population growth imposes on the agroindustry the challenge of increasing crop productivity with less environmental impact, prioritizing sustainable practices. The study aimed to analyze the effects of water deficit associated with the use of biomaterial on the soil metabolomic profile and plant development. The experiment was conducted in a greenhouse for 60 days, adopting a design with two biotic conditions: with tomato planting and without tomato planting; two types of substrate: with and without biomaterial addition; and two levels of water availability: 70% F.C. (field capacity) and 50% F.C. Biometric analyses (shoot height, root length and dry biomass) were performed to analyze the effect on plant development, and biochemical analyses (β -glucosidase, arylsulfatase, basal respiration, carbon of microbial biomass and metabolic quotient) were performed to provide information on microbial activity in the soil. Gas chromatography and mass spectrometry (GC-MS) analyses were also performed to identify changes in the metabolomic profile. The biometric results show that the presence of the biomaterial had a positive influence on plant development, since it presented a significant increase in shoot length and shoot and root biomass. The results obtained in the biochemical analyses showed an effect only of the presence/absence of the plant, with no significant effect of biomaterial or water deficit. The metabolomics results allowed grouping the different treatments based on the substrate profiles, influenced by the presence of biomaterials, water availability levels and interaction with tomato plants. Compounds with potential relevance for microbial activity and plant development were observed, suggesting that biomaterials can act as bioinputs, promoting plant growth and helping to mitigate water stress.

Key-words: sustainability; metabolomics; water deficit; biomaterial; plant development.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-	Ciclo global do carbono com estoques (em Pg C = 1015 g C) nos diferentes compartimentos da Terra e fluxos de carbono (em Pg C ano-1).....	.04
Figura 2-	Estoques totais de carbono orgânico do solo nos diferentes biomas brasileiros05
Figura 3-	Taxas de desmatamento anual e desmatamento anual cumulativo na Amazônia Legal.....	.05
Figura 4-	Fotos da montagem do experimento17
Figura 5-	Fotos da coleta de amostras de solo.....	.19
Figura 6-	Fotos das plantas de tomate coletadas a 45 DAP26
Figura 7-	Cromatograma de todas as amostras31
Figura 8-	Foto das plantas de tomates de cada tratamento, na coleta de 45 DAP49
Figura 9-	Foto das plantas de tomate de cada tratamento, na coleta de 60 DAP56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1-	<i>Volcano plot</i> adaptado para ANOVA de todos os tratamentos	32
Gráfico 2-	<i>Scores plot</i> da análise sPLS-DA de todos os tratamentos	32
Gráfico 3-	<i>Scores plot</i> da análise sPLS-DA dos tratamentos sem tomate na coleta 45 DAP	33
Gráfico 4-	<i>Fold Change</i> dos tratamentos sem tomate e com biomaterial na coleta 45 DAP	35
Gráfico 5-	<i>Scores plot</i> da análise orthoPLS-DA dos tratamentos sem tomate e com biomaterial na coleta 45 DAP	36
Gráfico 6-	<i>VIP score</i> da análise orthoPLS-DA dos tratamentos sem tomate e com biomaterial na coleta 45 DAP	36
Gráfico 7-	<i>Fold Change</i> dos tratamentos sem tomate e sem biomaterial na coleta 45 DAP	38
Gráfico 8-	<i>Scores plot</i> da análise orthoPLS-DA dos tratamentos sem tomate e sem biomaterial na coleta 45 DAP	39
Gráfico 9-	<i>VIP score</i> da análise orthoPLS-DA dos tratamentos sem tomate e sem biomaterial na coleta 45 DAP	39
Gráfico 10-	<i>Scores plot</i> da análise sPLS-DA dos tratamentos sem tomate na coleta 60 DAP.	41
Gráfico 11-	<i>Fold Change</i> dos tratamentos sem tomate e com biomaterial na coleta 60 DAP.....	44
Gráfico 12-	<i>Scores plot</i> da análise orthoPLS-DA dos tratamentos sem tomate e com biomaterial na coleta 60 DAP	44
Gráfico 13-	<i>VIP score</i> da análise orthoPLS-DA dos tratamentos sem tomate e com biomaterial na coleta 60 DAP	45
Gráfico 14-	<i>Fold Change</i> dos tratamentos sem tomate e sem biomaterial na coleta 60 DAP.....	47
Gráfico 15-	<i>Scores plot</i> da análise orthoPLS-DA dos tratamentos sem tomate e sem biomaterial na coleta 60 DAP	48
Gráfico 16-	<i>VIP score</i> da análise orthoPLS-DA dos tratamentos sem tomate e sem biomaterial na coleta 60 DAP	48
Gráfico 17-	<i>Scores plot</i> da análise sPLS-DA dos tratamentos com tomate	

	na coleta 45 DAP	50
Gráfico 18-	<i>Fold Change</i> dos tratamentos com tomate e com biomaterial na coleta 45 DAP	52
Gráfico 19-	<i>Scores plot</i> da análise orthoPLS-DA dos tratamentos com tomate e com biomaterial na coleta 45 DAP	52
Gráfico 20-	<i>VIP score</i> da análise orthoPLS-DA dos tratamentos com tomate e com biomaterial na coleta 45 DAP	53
Gráfico 21-	<i>Fold Change</i> dos tratamentos com tomate e sem biomaterial na coleta 45 DAP	54
Gráfico 22-	<i>Scores plot</i> da análise orthoPLS-DA dos tratamentos com tomate e sem biomaterial na coleta 45 DAP	55
Gráfico 23-	<i>VIP score</i> da análise orthoPLS-DA dos tratamentos com tomate e sem biomaterial na coleta 45 DAP	55
Gráfico 24-	<i>Scores plot</i> da análise sPLS-DA dos tratamentos com tomate na coleta 60 DAP	57
Gráfico 25-	<i>Fold Change</i> dos tratamentos com tomate e com biomaterial na coleta 60 DAP	59
Gráfico 26-	<i>Scores plot</i> da análise orthoPLS-DA dos tratamentos com tomate e com biomaterial na coleta 60 DAP	59
Gráfico 27-	<i>VIP score</i> da análise orthoPLS-DA dos tratamentos com tomate e com biomaterial na coleta 60 DAP	60
Gráfico 28-	<i>Fold Change</i> dos tratamentos com tomate e sem biomaterial na coleta 60 DAP	62
Gráfico 29-	<i>Scores plot</i> da análise orthoPLS-DA dos tratamentos com tomate e sem biomaterial na coleta 60 DAP	62
Gráfico 30-	<i>VIP score</i> da análise orthoPLS-DA dos tratamentos com tomate e sem biomaterial na coleta 60 DAP	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Oferta mássica de biomassa por resíduos agropecuários e florestais, no Brasil (milhões de toneladas).....	08
Tabela 2-	Resíduos agroindustriais, origem e composição.....	09
Tabela 3-	Parâmetros de altura da parte aérea, comprimento de raiz, biomassa seca de parte aérea e biomassa seca de raiz, para coleta de 45 DAP	27
Tabela 4-	Atividade enzimática da β -glicosidase em solo, nas coletas de 45 DAP e 60 DAP	28
Tabela 5-	Atividade enzimática de arilsulfatase em solo, nas coletas de 45 DAP e 60 DAP	28
Tabela 6.	Respiração basal do solo, nas coletas de 45 DAP e 60 DAP	29
Tabela 7-	Carbono de biomassa microbiana de solo, nas coletas de 45 DAP e 60 DAP	30
Tabela 8-	Quociente metabólico de solo, nas coletas de 45 DAP e 60 DAP	30
Tabela 9-	Metabólitos com maior variação de abundância entre os tratamentos sem tomate e com biomaterial na coleta 45 DAP.....	35
Tabela 10-	Metabólitos com maior variação de abundância entre os tratamentos sem tomate e sem biomaterial na coleta 45 DAP.....	37
Tabela 11-	Metabólitos com maior variação de abundância entre os tratamentos sem tomate e com biomaterial na coleta 60 DAP.....	42
Tabela 12-	Metabólitos com maior variação de abundância entre os tratamentos sem tomate e sem biomaterial na coleta 60 DAP.....	45
Tabela 13-	Metabólitos com maior variação de abundância entre os tratamentos com tomate e com biomaterial na coleta 45 DAP.....	50
Tabela 14.	Metabólitos com maior variação de abundância entre os tratamentos com tomate e sem biomaterial na coleta 45 DAP.....	53
Tabela 15-	Metabólitos com maior variação de abundância entre os tratamentos com tomate e com biomaterial na coleta 60 DAP.....	57
Tabela 16-	Metabólitos com maior variação de abundância entre os tratamentos com tomate e sem biomaterial na coleta 60 DAP.....	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1	Mudanças climáticas e a dinâmica do carbono no solo	3
2.2	Mineralização de resíduos agrícolas e sua importância para a homeostase e o sequestro de carbono no solo	6
2.3	Resíduos agrícolas como matéria-prima para aplicações biotecnológicas	8
2.4	Aplicações de biomateriais na agricultura	10
2.5	Análises biométricas de planta e bioquímicas de solo	12
2.6	Análises metabolômicas e identificação de redes metabólicas	13
3	MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1	Desenho experimental	16
3.2	Biomaterial	17
3.3	Montagem do experimento	18
3.4	Coleta de amostras para análises químicas e de perfil metabolômico	19
3.5	Análises biométricas	20
3.6	Análises bioquímicas	20
3.6.1	Atividade enzimática da β -Glicosidase	20
3.6.2	Atividade enzimática da Arilsulfatase	20
3.6.3	Carbono da Biomassa Microbiana (C-BMS).....	21
3.6.4	Respiração Basal do Solo (RBS)	21
3.7	Extração de metabólitos do solo	22
3.8	Determinação de metabólitos por gc-ms (cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas)	22
3.9	Análises estatísticas	23

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1	Análises biométricas	26
4.2	Atividade enzimática do solo	27
4.2.1	<i>β</i> -Glicosidase	27
4.2.2	Arilsulfatase	28
4.3	Respiração Basal do Solo (rbs)	29
4.4	Carbono da Biomassa Microbiana (bms-c)	29
4.5	Quociente metabólico (<i>q</i>_{CO₂})	30
4.6	Análises metabolômicas	31
4.6.1	Tratamentos sem tomate da Coleta 45 DAP.....	33
4.6.2	Tratamentos sem tomate da Coleta 60 DAP.....	40
4.6.3	Tratamentos com tomate da Coleta 45 DAP.....	49
4.6.4	Tratamentos com tomate da Coleta 60 DAP.....	56
5	CONCLUSÃO	64
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
	ANEXOS	77
	ANEXO A: Caracterização química do solo utilizado no experimento	78
	ANEXO B: Tabela de caracterização de todos os metabólitos encontrados nas amostras.....	79

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e a necessidade de segurança alimentar e energética pressionam a agroindústria para aumentar a produtividade com menor impacto ao sistema de produção. A economia circular entra como uma forma de alcançar esses objetivos para a atividade agrícola, como um modelo de produção baseado no compartilhamento, na reutilização, no reparo e na reciclagem de materiais e produtos existentes, em que os recursos devem ser mantidos na cadeia produtiva o maior tempo possível (Vaz Júnior, 2020; Tiozzi e Simon, 2021).

Globalmente, são geradas enormes quantidades de resíduos agrícolas (e não agrícolas) e o aproveitamento desses compostos é uma estratégia da economia circular para o alcance da sustentabilidade, que demanda o desenvolvimento de novos produtos e processos que reutilizam os resíduos e os transformem em novos produtos ou fontes de energia e nutrientes. Esse é o caso dos materiais compósitos biodegradáveis (biomateriais), que são produtos gerados a partir de fontes biológicas como os resíduos agrícolas, neste estudo o biomaterial utilizado possui em sua composição a casca de aveia, um resíduo lignocelulósico gerado pela indústria de cereais no processamento dos grãos de aveia (Giraldo, 2021).

Para a agricultura, um ponto importante da utilização de resíduos é a ciclagem do carbono por seu efeito sobre a qualidade do solo. A deposição da biomassa orgânica residual traz benefícios físicos, químicos e biológicos ao solo, melhorando as características relacionadas à produção agrícola com efeito sobre a produtividade. O uso racional de resíduos na agricultura também beneficia o meio ambiente, por promover aumento do sequestro de carbono no solo e reduzir a emissão de gases do efeito estufa, que possuem importância nas alterações climáticas (Cordeiro *et al.*, 2020; Lo Monaco *et al.*, 2019; Tessmann, 2021; Barros, 2022).

O solo é o maior reservatório de carbono dos ecossistemas terrestres, superando as quantidades presentes na atmosfera e na vegetação, possuindo papel importante na redução das mudanças climáticas. O manejo de compostos de carbono, de forma a preservar os estoques e aumentar o sequestro pelo solo, pode ser feito pela deposição de matéria orgânica. O dióxido de carbono (CO₂) é o principal gás de efeito estufa e principal produto da mineralização da matéria orgânica, logo o aumento dos teores de matéria orgânica no solo tende a reduzir as

emissões deste gás e, conseqüentemente, o impacto negativo sobre os fatores climáticos (Lal, 2004; Bossio *et al.*, 2020; Ataides *et al.*, 2022; Araujo Filho, 2022).

A microbiota do solo tem papel fundamental na taxa de mineralização da matéria orgânica, na formação de compostos de carbono recalcitrantes e no consumo do carbono para seu metabolismo e desenvolvimento. Esta atividade carrega vantagens para a agricultura, pois são (re)ciclosados macro e micronutrientes que são disponibilizados para as plantas, tornando a produção agrícola menos dependente de insumos químicos. Desta forma, a qualidade do solo é dependente da atividade microbiana, que por sua vez depende da qualidade e quantidade dos resíduos vegetais depositados ao solo, em um equilíbrio homeostático frágil. Este equilíbrio pode ser perdido pela adoção de práticas agrícolas baseadas no aporte contínuo de insumos de modo indiscriminado ao sistema de produção, levando a perdas constantes da qualidade do solo, ou pode ser restaurado a níveis maiores de sustentabilidade por meio da economia circular (Giongo *et al.*, 2022).

Este trabalho tem como objetivo elucidar se os tratamentos aplicados e a interação entre eles possuem influência na dinâmica de carbono no solo e com isso esclarecer os possíveis efeitos das alterações climáticas nos sistemas produtivos. Também busca determinar se a aplicação do biomaterial influencia o desenvolvimento das plantas de tomate e se os tratamentos hídricos alteram o perfil metabólico do solo. Os resultados encontrados podem auxiliar no alcance da sustentabilidade na agricultura.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. MUDANÇAS CLIMÁTICAS E A DINÂMICA DO CARBONO NO SOLO

Segundo o relatório publicado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, sigla em inglês), a temperatura da superfície global está 1,1 °C mais elevada no período de 2011-2020 quando comparada com o período de 1850-1900 (IPCC, 2023). Isso é resultado direto da emissão de gases do efeito estufa gerados pelo ser humano. O aumento da concentração dos gases CO₂, metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) na atmosfera correspondem ao principal motivo do aquecimento do planeta e a origem destes gases está relacionada com o consumo excessivo de energia, recursos naturais e os padrões insustentáveis de produção da sociedade moderna (IPCC, 2023).

As mudanças na temperatura do planeta já causam impactos em todas as regiões do globo, alterando o clima de forma extrema, que por sua vez afeta a segurança alimentar e hídrica, a saúde e a economia das populações, além de causar danos ao meio ambiente. Estas alterações climáticas constituem uma ameaça global com consequências negativas para todos os setores da economia (Abbass *et al.*, 2022; IPCC, 2023; Ortiz *et al.*, 2021).

O crescimento e a reprodução de plantas e animais é dependente de fatores climáticos, como temperatura e precipitação, logo mudanças nesses elementos trazem consequências para a distribuição da fauna e da flora (Bustamante; Nardoto; Pinto, 2010). Os efeitos negativos na dinâmica dos ecossistemas terrestres e aquáticos se iniciam com a inibição do crescimento vegetal, mortalidade e seleção de espécies resistentes, alterações na composição da vegetação e competição entre as espécies (Vieira, 2011). Isso resulta em consideráveis perdas na biomassa viva que passa a ser liberada na atmosfera (Muniz *et al.*, 2022).

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera são a principal causa das mudanças no clima, onde o CO₂ possui grande importância. Logo, o estudo desse elemento e de seu ciclo biogeoquímico auxiliam no entendimento das alterações climáticas e possibilitam prever cenários futuros. O carbono está presente em todos os seres vivos sendo a base de todas as moléculas orgânicas; é componente da atmosfera terrestre e fundamental para respiração, fotossíntese e regulação do clima (Martins *et al.*, 2003).

O ciclo do carbono ocorre predominantemente na biosfera, onde o carbono atmosférico é fixado pelo processo da fotossíntese e transformado em biomassa. Essa biomassa serve como matéria-prima energética ou biossintética para os seres vivos que, após sua morte, passam pelo processo de decomposição. Este processo de decomposição, ou mineralização, pode ser completo e caracterizado pela transformação do C-orgânico em CO₂ que retorna para a atmosfera, junto com CH₄ e H₂O.

Por outro lado, parte da biomassa pode passar por um processo de mineralização parcial, onde o C-orgânico é transformado em compostos recalcitrantes de carbono (como os combustíveis fósseis), que se acumulam no solo e sedimentos. Eventualmente, os compostos recalcitrantes de carbono podem ser transformados em CO₂, como pela queima de combustíveis fósseis, liberando carbono na atmosfera. Ou seja, o carbono fixado na fotossíntese pode retornar para atmosfera pela decomposição de matéria orgânica ou pela ação humana (Bessa, 2019). Os principais estoques globais de carbono e os fluxos anuais de maior magnitude estão representados na figura abaixo.

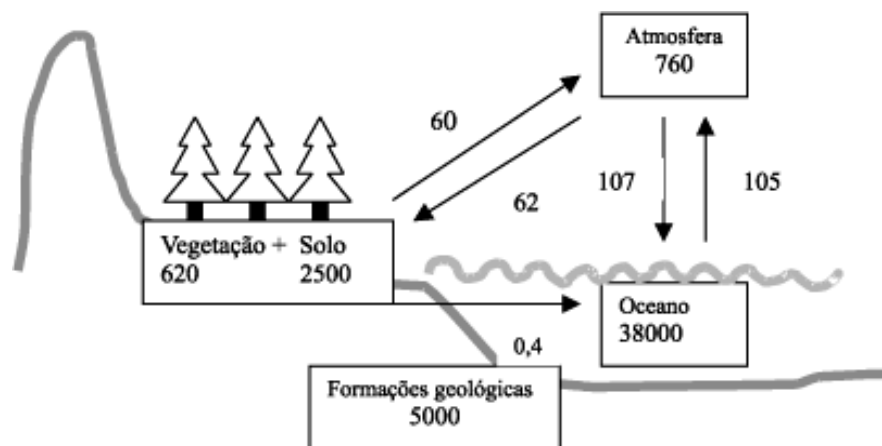


Figura 1. Ciclo global do carbono com estoques (em Pg C = 10¹⁵ g C) nos diferentes compartimentos da Terra e fluxos de carbono (em Pg C ano⁻¹). Fonte: Machado, 2005.

Uma parte deste ciclo ocorre no solo, onde o carbono está presente principalmente na forma de matéria orgânica. O solo é o maior compartimento terrestre de carbono e armazena cerca de 2500 Pg C (2500 bilhões de toneladas métricas de C), três vezes mais do que o carbono armazenado na atmosfera (Lal, 2004; Machado, 2005; Cias *et al.*, 2013; Rumpel *et al.*, 2020; Ataide *et al.*, 2022). No Brasil, a maior parte desses estoques está no solo amazônico (Figura 2) (Batjes,

2005; Gomes *et al.*, 2019), e as alterações climáticas, juntamente com os desmatamentos (cumulativo anual de mais de 450.000 km² em 2021 - Figura 3) para implantação de pastagens e áreas de cultivo agrícola na Floresta Amazônica, impulsionam a liberação de grandes quantidades de carbono na atmosfera, agravando ainda mais o efeito estufa e o aquecimento global (Barros e Fearnside, 2016; Ozório *et al.*, 2020).

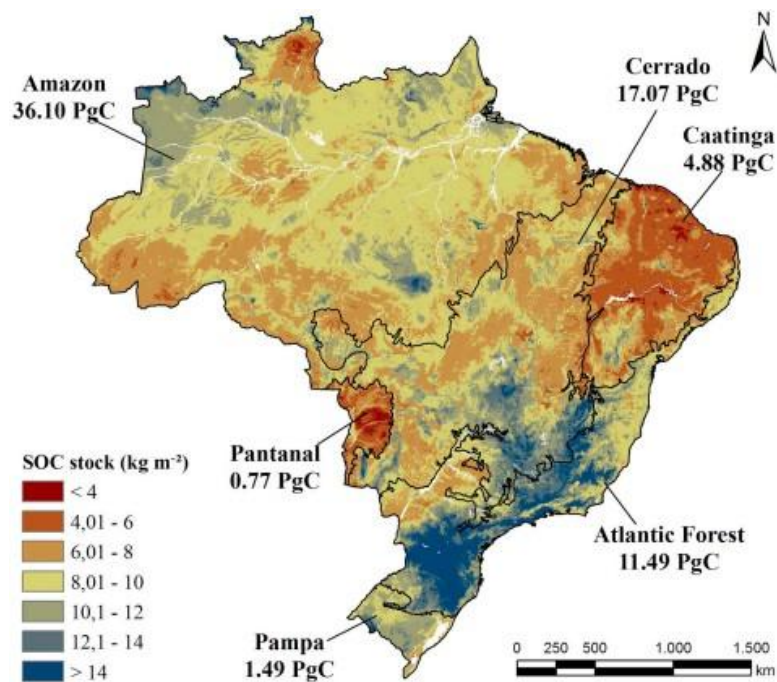


Figura 2. Estoques totais de carbono orgânico do solo nos diferentes biomas brasileiros. Fonte: Gomes *et al.*, 2019.

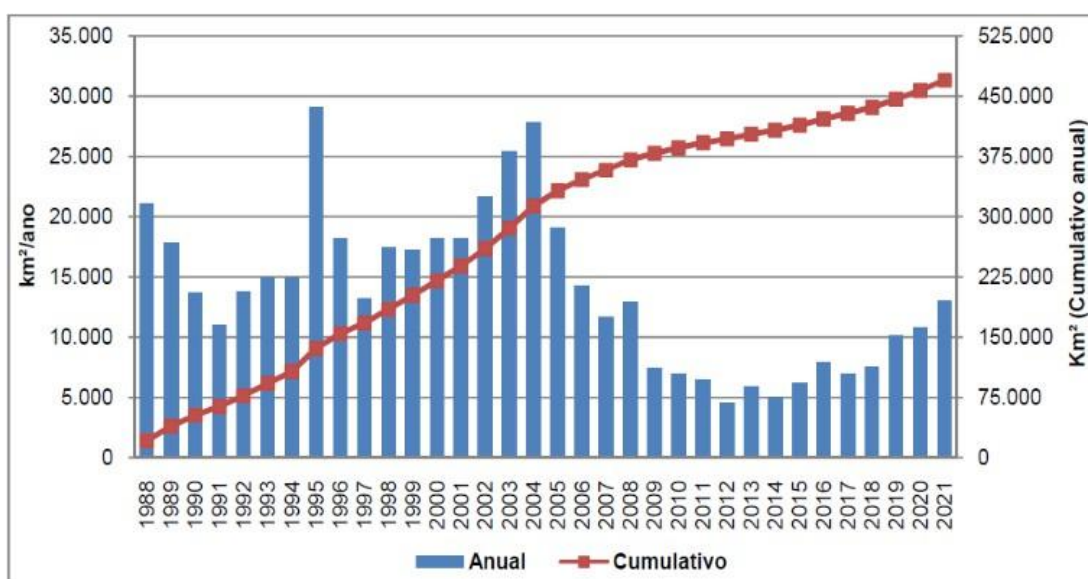


Figura 3. Taxas de desmatamento anual e desmatamento anual cumulativo na Amazônia Legal. Fonte: INPE/PRODES 2022.

A capacidade de absorção e armazenamento de carbono coloca os ecossistemas naturais terrestres em posição importante no combate às alterações climáticas (Houghton, 2005; Reichstein e Carvalhais, 2019). Estudar o ciclo do carbono nos solos de floresta, como o carbono e outros compostos se comportam nesses ecossistemas e a interação desses solos com o clima são um ponto chave para entender realmente o que as mudanças climáticas estão causando no mundo e as consequências que essas alterações trazem aos ecossistemas e aos seres vivos.

2.2. MINERALIZAÇÃO DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS E SUA IMPORTÂNCIA PARA A HOMEOSTASE E O SEQUESTRO DE CARBONO NO SOLO

Mineralização é a decomposição da matéria orgânica e sua transformação em matéria inorgânica por meio da ação de microrganismos presentes no solo (Franco *et al.*, 2022). No caso dos resíduos agrícolas, a biomassa é a principal fonte de matéria orgânica e sua deposição no solo disponibiliza macro e micronutrientes, conserva os recursos naturais e melhora a estrutura e estabilidade dos agregados do solo, as condições físico-hídricas e a retenção de água no solo (Matos, 2010; Lo Monaco *et al.*, 2019; Barros, 2022).

Apesar dos benefícios, a utilização da biomassa deve ser controlada, pois o solo e as culturas apresentam uma capacidade máxima de necessidade mineral, de forma que se depositada acima do limite pode acarretar problemas ambientais, como aumento da população de patógenos e concentração de metais pesados, além de estimular a produção e emissão de gases do efeito estufa pela microbiota e poluir as águas superficiais e subterrâneas, induzindo a eutrofização (Pereira *et al.*, 2015; Tripathi *et al.*, 2019; Lo Monaco *et al.*, 2019).

A principal forma de armazenagem do carbono no solo é como carbono orgânico (COS), este é encontrado na matéria orgânica do solo (MOS) e representa cerca de 50% desta (Araujo Filho *et al.*, 2022). Historicamente, o reservatório global de carbono apresenta perdas, estimado entre 42-78 Gt (Lal, 2004), e o presente cenário de aquecimento é uma ameaça de perdas ainda maiores. A conservação dos estoques de COS existentes e a restauração deste em solos que já sofreram perdas é uma estratégia para a manutenção da fertilidade do solo, para aumento da resiliência frente às alterações climáticas, para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa e para a redução da erosão do solo (Bossio *et al.*, 2020).

O sequestro e armazenamento de carbono no solo não só atuam como fator de mitigação das alterações climáticas, mas também influenciam na produtividade dos agroecossistemas, uma vez que esta é dependente da ciclagem de carbono. A microbiota do solo consome o COS da biomassa e mineraliza os nutrientes, disponibilizando-os para as plantas, sendo um processo importante para o desenvolvimento de ambos, logo a deposição de matéria orgânica e sua decomposição atuam na melhoria da produtividade (Giongo *et al.*, 2022).

A velocidade e dinâmica da mineralização dos resíduos agrícolas depende de sua composição e da relação carbono/nitrogênio (C/N). Os restos culturais que apresentam relação C/N alta ($C/N > 30:1$) tendem a imobilização do N na biomassa dos microrganismos decompositores, enquanto resíduos com uma relação C/N baixa ($C/N < 20:1$), tendem a mineralização rápida, com maior taxa de respiração pelos microrganismos decompositores e maior liberação de nutrientes. Dessa forma, quando a relação C/N é baixa a decomposição é mais rápida, e vice-versa (Blanco-Canqui e Lal, 2009; Wenneck *et al.*, 2019; Barros, 2022).

Os resíduos vegetais com baixa relação C/N, por exemplo os resíduos da cultura da soja, possuem maiores teores de frações lábeis, que são compostos com baixo peso molecular, rápida decomposição e apresentam um curto período de permanência no solo. O carbono presente nesta fração lábil da biomassa atua como fonte primária na manutenção da microbiota do solo e na ciclagem de nutrientes, porém essa atividade é afetada pelo manejo e uso do solo (Coppens, Merckx e Recous, 2006; Moreira, 2018; Barros, 2022).

Solos sob regime de preparo intensivo, juntamente com a irrigação e a utilização de fertilizantes químicos em excesso apresentam perdas significativas de carbono orgânico, além de estarem sujeitos à salinização. Por outro lado, solos sob plantio direto ou preparo mínimo podem aumentar o armazenamento de COS e mitigar a perda por decomposição de C, essa prática também tem efeitos nas propriedades do solo (van Groenigen *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2023). Assim, práticas de manejo adequadas, como o não revolvimento do solo, permitem aumento significativo no estoque de carbono orgânico, regulação do fluxo dos gases do efeito estufa e mitigação dos impactos climáticos (Smith *et al.*, 2015; Carneiro *et al.*, 2018; Giongo *et al.*, 2020).

2.3. RESÍDUOS AGRÍCOLAS COMO MATÉRIA-PRIMA PARA APLICAÇÕES BIOTECNOLÓGICAS

No Brasil, bilhões de toneladas de resíduos agrícolas são gerados anualmente (Tabela 1), em quantidade estimada em 2,9 Gt (1 gigatonelada = 1 bilhão de toneladas) para o ano de 2030 (Bernardo *et al.*, 2022). Grande parte destes resíduos não têm uma destinação adequada, causando graves impactos ambientais, como a degradação do solo, a poluição da água e riscos para a fauna e flora (Santos, 2024). O reaproveitamento é uma alternativa para reduzir os danos ao meio ambiente, reduzir custos de produção, gerar novas fontes de renda e possibilitar a criação de novos produtos (Terrasan e Carmona, 2015; Cordeiro *et al.*, 2020; Tessmann, 2021).

Biomassa residual	Ano				
	2005	2010	2015	2020	2030
Resíduos Agrícolas	478	633	768	904	1196
Soja	185	251	302	359	482
Milho	176	251	304	361	485
Arroz (palha)	57	59	62	66	69
Cana-de-açúcar	60	73	100	119	160
Resíduos agroindustriais	80	98	130	154	207
Cana-de-açúcar (bagaço)	58	70	97	115	154
Arroz (casca)	2	2	3	3	3
Lixívia	13	17	21	25	34
Madeira	6	8	10	12	16
Florestas energéticas	13	30	31	43	46
Madeira excedente	13	30	31	43	46
Total	1141	1522	1859	2204	2898

Tabela 1. Oferta mássica de biomassa por resíduos agropecuários e florestais, no Brasil (milhões de toneladas). Fonte: Bernardo *et al.*, 2022.

A geração anual global de resíduos agrícolas de origem vegetal é estimada na ordem de 140 Gt (Tripathi *et al.*, 2019), sendo 66% proveniente da cultura de cereais, como trigo, arroz, milho e cevada (Hills *et al.*, 2020). Os resíduos primários de biomassa agrícola são compostos por caules, folhas, sementes, raízes e cascas que não são consumidos diretamente como alimento. O descarte destes resíduos deve ser controlado para evitar danos ao ambiente. Entretanto, mais de 2 Gt dessa biomassa é despejada em aterros ou queimada, atividade que representa 18% das

emissões globais de CO₂ (Jain, Pathak, Bhatia, 2014; Devi *et al.*, 2017; Tripathi *et al.*, 2019).

Os resíduos agroindustriais apresentam alta heterogeneidade e complexidade química, o que permite uma ampla aplicabilidade e produção de vários produtos finais (Vaz Júnior, 2020). A biomassa residual pode ser utilizada como uma fonte renovável na geração de energia, um exemplo disso é a produção de etanol de segunda geração a partir de resíduos ricos em lignocelulose, como o bagaço e a palha da cana-de-açúcar (Almeida e Nascimento, 2021). Outros exemplos de utilização de resíduos agrícolas de origem vegetal são: a fabricação de polímeros e resinas, a geração de bioenergia, a produção de insumos agrícolas como biofertilizantes e biosurfactantes, além da utilização em alimentos e rações para animais (Vaz Júnior, 2020). A tabela abaixo apresenta exemplos de resíduos de agroindústrias, sua origem e composição.

Resíduo	Origem	Composição	Fonte
Melaço de soja	resíduo proveniente do processo de beneficiamento da soja	carboidratos, proteínas e lipídeos	Chagas <i>et al.</i> , 2017 Silva <i>et al.</i> , 2019
Manipueira	líquido resultante da prensagem das raízes de mandioca durante o processo de fabricação da farinha	nitrogênio, sais minerais, metais e cianeto	Amorin <i>et al.</i> , 2016 Jesus <i>et al.</i> , 2016
Milhocina	subproduto agroindustrial proveniente do processamento do milho	carboidratos, aminoácidos, peptídeos, vitaminas, sais minerais e nitrogênio	Barros <i>et al.</i> , 2016
Glicerol	obtido por meio da fermentação biológica, síntese química, subproduto na fabricação de sabão, hidrogenação da sacarose, produção do bioetanol, subproduto em processos de transesterificação de óleos vegetais e animais para fabricação de biodiesel	glicerol, ácidos graxos, metanol, catalisadores, sais de potássio e sódio, metais pesados, outros materiais orgânicos	Silva; Souza; Antero, 2017 Santibáñez; Varnero; Bustamante, 2011; Penha <i>et al.</i> , 2016

Tabela 2. Resíduos agroindustriais, origem e composição. Fonte: adaptado de Souza *et al.*, 2021.

A produção biotecnológica de biopolímeros (polissacarídeos de origem natural) a partir de resíduos agroindustriais é altamente utilizada na indústria alimentícia, podendo ser empregados como matrizes de revestimento e conservação de alimentos. Por exemplo, as embalagens bioativas apresentam a capacidade de reduzir a deterioração do alimento por meio de atividade antimicrobiana e antioxidante, atividade essa que provém dos biopolímeros em sua composição, como a celulose e a quitosana. Outros fatores também contribuem para a utilização dos polímeros naturais na conservação de alimentos, como a baixa toxicidade, biodegradabilidade, biocompatibilidade, além de características físicas de interesse industrial (Tavares *et al.*, 2017; Souza *et al.*, 2021).

Os biopolímeros também possuem aplicação na agricultura, por meio da formulação de fertilizantes de liberação lenta/controlada (Borelli, 2020). Estes são revestidos com polímeros que podem ser extraídos de resíduos agroindustriais, onde os mais utilizados são a quitosana (Messa *et al.*, 2020; Flores-Rojas *et al.*, 2020), biochar (Chen *et al.*, 2018; An *et al.*, 2020), amido (Qiao *et al.*, 2016; Salimi *et al.*, 2023), celulose (Lohmousavi *et al.*, 2020; Bai *et al.*, 2023), lignina (Chowdhury, 2014; Abbas *et al.*, 2022), entre outros.

2.4. APLICAÇÕES DE BIOMATERIAIS NA AGRICULTURA

Nos últimos anos, a crescente demanda por alimentos, combinada com os desafios ambientais enfrentados pela agricultura moderna, tem impulsionado a busca por alternativas que aumentem a produtividade mas não prejudiquem o meio ambiente. O uso de biomateriais, ou materiais de origem biológica, tem emergido na agricultura como uma solução para muitos desses desafios, oferecendo benefícios como maior sustentabilidade, menor impacto ambiental, maior eficiência no uso de recursos e maior produtividade (Sun *et al.*, 2022). Diferentes tipos de biomateriais, como polímeros biodegradáveis, extratos vegetais e compostos à base de carbono, têm sido aplicados em diversas áreas da agricultura.

Uma das principais áreas de aplicação dos biomateriais na agricultura é a fertilização e a regeneração do solo. Fertilizantes de liberação controlada, que utilizam biomateriais como polímeros biodegradáveis ou compósitos à base de algas e amido, têm demonstrado eficácia no fornecimento gradual de nutrientes às plantas. Esses fertilizantes ajudam a reduzir a lixiviação de nutrientes e a poluição

da água, além de melhorar a eficiência no uso de fertilizantes, um dos principais desafios na agricultura convencional (Bomfim, 2024).

Além disso, compostos à base de biochar, um material produzido a partir de biomassa carbonizada, têm sido utilizados para melhorar a estrutura do solo, aumentar a retenção de água e promover a atividade microbiana benéfica. A adição de biochar ao solo não apenas melhora suas propriedades físico-químicas, mas também contribui para a captura de carbono, ajudando a mitigar os efeitos das mudanças climáticas (Liu *et al.*, 2024). O biochar também tem sido utilizado como veículo para inoculação, por aumentar a persistência, sobrevivência e colonização de microrganismos no solo e nas raízes de plantas, desempenhando um papel crucial na ciclagem de nutrientes e na remediação da contaminação do solo (Bolan *et al.*, 2023).

Os mulches biodegradáveis são outra aplicação importante dos biomateriais na agricultura, como aqueles feitos a partir de amido, celulose ou cascas de sementes. São usados para cobrir o solo, ajudando a controlar a temperatura, reduzir a evaporação de água e prevenir o crescimento de ervas daninhas (Menossi *et al.*, 2021). Em comparação com os plásticos tradicionais, esses mulches oferecem uma alternativa mais ecológica, pois se decompõem naturalmente sem deixar resíduos no ambiente.

O uso de hidrogéis biodegradáveis em sistemas agrícolas tem sido estudado como uma forma de melhorar a retenção de água no solo, especialmente em áreas áridas ou com baixos índices de precipitação. Esses hidrogéis, compostos por materiais como algas ou polissacarídeos naturais, têm a capacidade de absorver grandes volumes de água (água absorvida ultrapassa 100% do seu peso) e liberá-la lentamente, ajudando as plantas a manterem-se hidratadas durante períodos de seca (Lima, 2021).

Já os biomateriais que apresentam em sua composição o amido, como é o caso do utilizado neste estudo, possuem propriedades protetoras para as células microbianas baseadas na adesão celular ao amido, provando sua aplicabilidade como carreador ou aditivo de populações microbianas benéficas para as plantas (Bashan *et al.*, 2002; Vassilev *et al.*, 2020). Ainda como parte de sua composição, esse biomaterial apresenta açúcar cristal que preserva os microrganismos de mudanças na pressão osmótica contribuindo para sua conservação e manutenção (Morgan *et al.*, 2006). Além de possuir o aditivo ácido húmico que tem ação positiva

no crescimento vegetal por estimular a atividade microbiana (Rekha *et al.*, 2007), e também apresenta efeito na fisiologia das plantas (Nardi *et al.*, 2002).

Embora o uso de biomateriais na agricultura tenha mostrado resultados promissores, ainda existem desafios significativos para a sua adoção em larga escala. A produção de biomateriais de alta qualidade e a sua escalabilidade são questões importantes a serem resolvidas, assim como os custos envolvidos. Além disso, a necessidade de regulamentação e padronização desses materiais para garantir sua segurança e eficácia no campo também representa um obstáculo.

Apesar desses desafios, as perspectivas futuras para o uso de biomateriais na agricultura são otimistas, com o contínuo desenvolvimento de novas tecnologias e materiais mais eficientes. O avanço das pesquisas em engenharia de materiais, como a modificação de polímeros naturais e a combinação de diferentes tipos de biomateriais, tem o potencial de expandir ainda mais suas aplicações e melhorar a sustentabilidade da agricultura.

2.5. ANÁLISES BIOMÉTRICAS DE PLANTA E BIOQUÍMICAS DE SOLO

Parâmetros biométricos de plantas são indicadores importantes da capacidade de sobrevivência e desenvolvimento no campo, do vigor e da resistência a condições adversas, como secas e altas temperaturas (Grossnickle e MacDonald, 2018; Gallegos-Cedillo *et al.*, 2021). Altura de planta está correlacionada com a quantidade de nós presentes no caule e, conseqüentemente, com a quantidade de ramos e folhas que serão geradas, trazendo informações sobre a capacidade fotossintética, assim como a biomassa seca de parte aérea que também evidencia o potencial fotossintético da planta. Já o sistema radicular está ligado ao crescimento vegetal e a sobrevivência da planta em situações de estresse, além da capacidade de absorção de água e nutrientes (Haase, 2008).

As análises de atividade enzimática exprimem informações sobre a atividade microbiana no solo. O grupo de enzimas das β -glicosidase hidrolisam ligações β -glicosídicas presentes em polissacarídeos, principalmente relacionados com a celulose, liberando glicose que pode servir como fonte de energia. Quando liberadas no solo, participam da ciclagem do carbono por meio da decomposição da matéria orgânica. A atividade dessa enzima é um indicador de qualidade de solo, atividade microbiana e presença e decomposição de matéria orgânica (Mendes *et al.*, 2021).

Outra enzima também estudada nas análises de solo são as arilsulfatases, que fazem parte do ciclo do enxofre (S), e quando presente no solo atuam na mineralização do S-orgânico para SO_4^{2-} (íon sulfato), que é a forma absorvida pelas plantas. A atividade dessa enzima é um indicador de qualidade de solo e de disponibilidade de enxofre (Santos *et al.*, 2024).

Outro parâmetro analisado é a respiração basal do solo, que é a soma total de todas as funções metabólicas que produzem CO_2 , sendo que a maior parte desse gás é gerado via degradação da matéria orgânica por microrganismos (Silva, Azevedo, De-Polli, 2007). Ainda, o carbono da biomassa microbiana, que representa a quantidade de C presente nos microrganismos do solo, está diretamente relacionado ao metabolismo microbiano e à atividade biológica do solo, uma vez que o C na forma de matéria orgânica é consumido pela microbiota para realizar suas funções metabólicas.

Já o quociente metabólico é a razão entre a respiração basal e o carbono da biomassa microbiana. O resultado indica a eficiência dos microrganismos no uso da matéria orgânica, refletindo um equilíbrio entre o uso dos recursos do solo e sua decomposição (Anderson; Domsch, 1993). Valores mais altos podem indicar que os microrganismos estão consumindo rapidamente o carbono disponível, mas de forma menos eficiente, ou seja, há mais CO_2 sendo liberado na atmosfera do que sendo consumido. Já valores menores indicam uma maior eficiência na utilização da matéria orgânica e menor liberação de CO_2 (Antisari *et al.*, 2021).

2.6. ANÁLISES METABOLÔMICAS E IDENTIFICAÇÃO DE REDES METABÓLICAS

Ciências ômicas são aquelas que estudam o comportamento celular dos organismos e suas alterações biológicas, e compreendem a genômica, transcriptômica, proteômica e metabolômica, entre outras (Canuto *et al.*, 2018). A genômica estuda a composição e as alterações nos genes; a transcriptômica estuda a composição e as alterações dos transcritos e a proteômica estuda a composição e as alterações das proteínas, seja de uma única célula ou de uma amostra ambiental complexa (Canuto *et al.*, 2018). A metabolômica busca estudar e quantificar o conjunto integral de metabólitos sintetizados por um sistema biológico ou organismo,

e tem como principal finalidade elucidar as interações químicas-biológicas e o papel dos metabólitos nestes sistemas (Fiehn, 2002; Hernandez Filho, 2021).

Metabólitos são os produtos secundários ou finais do metabolismo de uma amostra biológica, resultado da expressão gênica e da função de proteínas. O conjunto desses produtos é chamado de metaboloma que inclui várias biomoléculas, como aminoácidos, carboidratos, lipídeos e açúcares, assim como os metabólitos envolvidos em vias de biossíntese e de biodegradação apresentando várias funções no organismo (Gamache *et al.*, 2004; Bento, 2020). A partir do entendimento das mudanças sistêmicas de um complexo biológico multicelular ao longo de tempo, a metabolômica busca descrever analiticamente amostras biológicas, por meio da caracterização e quantificação de moléculas que fazem parte de seu metabolismo (Nicholson; Lindon, 2008). De modo geral, uma análise metabolômica é realizada a partir de uma amostra de onde é feita a extração dos metabólitos, seguido de análise instrumental e processamento e, por fim, a análise e interpretação dos dados obtidos. (Hernandez Filho, 2021).

Muitas técnicas são utilizadas para análises metabolômicas, sendo uma delas a cromatografia gasosa em conjunto com um espectrômetro de massas (GC-MS – gas chromatography with mass spectrometry). Os dados que são obtidos a partir de análises por espectrometria de massas (MS), com ou sem a fragmentação dos compostos da amostra, são importantes para a pesquisa metabolômica. De igual importância está a escolha do analisador de massa, modo de obtenção e parâmetros instrumentais para uma determinada análise e processos de extração e preparo de amostras, dependentes dos objetivos experimentais, que podem variar de qualitativos e exploratórios a quantitativos e direcionados (Gamache *et al.*, 2004).

O GC-MS combina os pontos fortes dos dois métodos: a alta resolução do sistema de cromatografia e a alta sensibilidade dos detectores do MS, sendo a identificação do metabólito um passo chave da análise metabolômica. Com base no cromatograma gerado pelo método GC-MS, juntamente com softwares e bibliotecas, é possível identificar os compostos presentes na amostra e a partir disso buscar as vias metabólicas às quais eles pertencem (Zeki *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2012).

A metabolômica de solos caracteriza pequenas moléculas e fornece informações diretas sobre a transformação e estabilização do carbono, bem como dos constituintes da matéria orgânica do solo (MOS). As análises de metabolômica não-direcionadas buscam elucidar o máximo possível de moléculas do perfil de

metabólitos do solo, enquanto as análises semi-direcionadas focam em uma classe molecular específica (por exemplo, compostos nitrogenados ou ácidos graxos) (Overy *et al.*, 2021). O ambiente do solo é complexo e as características químicas da MOS é um reflexo de efeitos bióticos e abióticos, de forma que a metabolômica vinculada ao solo têm sido usada para determinar e comparar perfis metabólicos de solos em avaliações ecológicas (Beale *et al.*, 2017, 2018), para estudar o armazenamento de carbono no permafrost (Ward e Cory, 2015), com corretivos de solo (Mitchell *et al.*, 2015) e para desenvolver meios de crescimento melhorados para a microbiota do solo (Jenkins *et al.*, 2017).

Análises de metabolômica não-direcionada, como a realizada neste estudo, permitem caracterizar a composição química do solo, que compreende metabólitos microbianos importantes, e o monitoramento dessas moléculas pode fornecer informações sobre o estado fisiológico do sistema (Swenson *et al.*, 2015). A caracterização da MOS, e conseqüentemente do COS, elucidada a rota metabólica do C e sua forma de fixação no solo ou liberação na atmosfera, gerando hipóteses para a mitigação do efeito estufa e aumento dos estoques de carbono no solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. DESENHO EXPERIMENTAL

O experimento foi realizado em casa de vegetação, com solo de mata (LVe, camada superficial 0-10 cm) e areia em proporção 1:3, cada tratamento teve 8 repetições, sendo 4 para a coleta aos 45 dias após plantio (DAP) e 4 para a coleta aos 60 DAP. Foi utilizado copos plásticos de 500 mL como vasos, perfurados na base para permitir a livre drenagem (Figura 4). Cada vaso foi preenchido com 500 g de substrato preparado a partir da mistura de solo e areia na proporção indicada acima.

Para determinação da quantidade de água armazenada, primeiro foi obtido o peso dos vasos com substrato totalmente seco, sendo este peso anotado como base para os cálculos. Depois os vasos foram irrigados em abundância até a saturação, e deixados para drenar por gravidade por 24 horas, então foram pesados novamente obtendo-se o peso dos vasos com o substrato na capacidade máxima de retenção de água, ou capacidade de campo (C.C.). A quantidade de água nos vasos sob C.C. foi obtida pela diferença entre o peso dos vasos com substrato na C.C. e o peso dos vasos com o substrato seco; o resultado obtido representa a quantidade (ou volume) de água quando os vasos se encontram na C.C. A partir disso foi possível calcular o peso necessário para aplicar os diferentes níveis de déficit hídrico determinados no desenho experimental.

Os tratamentos compreenderam duas condições bióticas: com plantio de tomate e sem plantio de tomate; dois tipos de substrato: com adição de biomaterial e sem adição de biomaterial; e dois níveis de disponibilidade hídrica: 70% C.C. e 50% C.C. O fluxograma a seguir resume os tratamentos adotados neste trabalho:

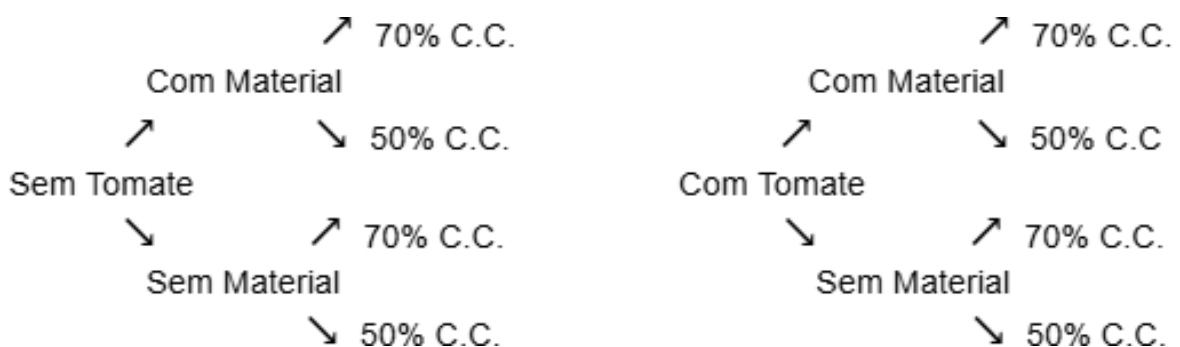




Figura 4. Fotos da montagem do experimento. a) Copos utilizados como vasos; b) Detalhe dos furos feitos embaixo do copo; c) Camada de biomaterial colocada na altura média dos vasos; d) Vasos preenchidos com a mistura solo-areia e identificados com cores para diferenciar os tratamentos.

3.2. BIOMATERIAL

O biomaterial utilizado no estudo foi preparado baseado no trabalho de Marcelino *et al.* (2016) com modificações: uso de casca de aveia como resíduo lignocelulósico no lugar do bagaço de cana-de-açúcar e adição de ácido húmico, tanino e carboximetilcelulose (CMC) em quantidades menores do que 1% na formulação final. A partir da mistura dos componentes a produção é feita em extrusora por fusão.

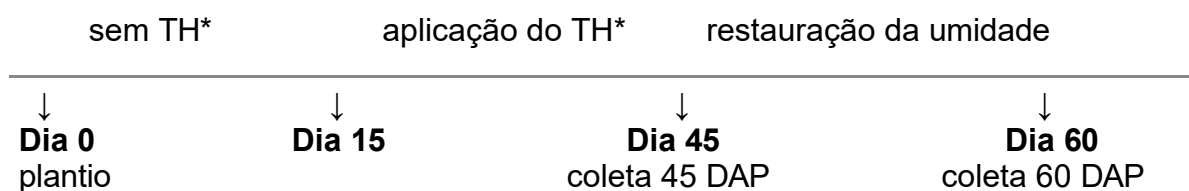
Embora o objetivo primário do produto seja servir como suporte para inoculação de bactérias e fungos que promovem o crescimento vegetal, neste trabalho ele foi utilizado por sua capacidade de absorção de água, onde o biomaterial não-estéril apresenta absorção de $0,84 \text{ g H}_2\text{O g}^{-1}$ biomaterial após 30 minutos de imersão (Marcelino *et al.*; 2016).

3.3. MONTAGEM DO EXPERIMENTO

O solo do estudo (Anexo A) foi coletado em área de mata (Lve, 0-10 cm), localizada próxima ao Orquidário da Universidade Estadual de Londrina - UEL. Posteriormente, o solo foi passado em peneira com abertura de 4,75 mm, peneirado e misturado com areia em proporção 1:3. Foram utilizados um total de 8 kg de solo peneirado e 24 kg de areia. A mistura de solo-areia foi distribuída (500 g) nos vasos, para os tratamentos com biomaterial, foi colocada a mistura até metade do vaso, depois foi adicionado 5 g do biomaterial (Figura 4) e por fim o restante da mistura até totalizar 500 g. Para todos os vasos foram realizadas marcações dos tratamentos com colheres de plástico coloridas, onde cada cor representa um tratamento: vermelho – com tomate; verde - sem tomate; roxo – com biomaterial; amarelo - sem biomaterial; azul claro - 50% C.C.; azul escuro - 70% C.C. Os vasos foram então deixados na casa de vegetação, ainda sem irrigar, por 7 dias para aclimação.

Após esse período, os vasos foram irrigados em abundância e no dia seguinte foi feito o plantio das sementes de tomate, obtidas em casa agropecuária, sendo este o dia 0 do experimento. O plantio foi feito pela abertura de sulcos rasos (aproximadamente 1 cm de profundidade), depois feita a deposição de 5 sementes e por fim pela cobertura com o substrato, o desbaste foi realizado com 7 DAP, deixando apenas uma planta.

Durante os primeiros 15 dias, os vasos foram irrigados diariamente, para permitir a germinação. A partir do dia 16, foram aplicados os tratamentos hídricos de 70% C.C. e 50% C.C. e mantidos assim por 30 dias. A quantidade de água nos vasos foi monitorada diariamente por gravimetria, com reposição da quantidade de água de cada vaso para mantê-los dentro dos valores de disponibilidade hídrica determinados. Após 45 dias de semeadura, foi feita a primeira coleta (coleta 45 DAP), também foi restabelecida a umidade de todos os vasos para 70% e mantidos assim por mais 15 dias. Por último, foi feita a coleta 60 DAP, e finalizado o experimento. Abaixo está uma linha do tempo do experimento:



*TH - tratamento hídrico

3.4. COLETA DE AMOSTRAS PARA ANÁLISES QUÍMICAS E DE PERFIL METABOLÔMICO

Durante o período experimental, foram realizadas duas coletas para determinação do perfil metabolômico das amostras, como descrito a seguir. As coletas foram feitas em tubos plásticos (15 mL de volume) graduados e esterilizados. A parte superficial do substrato foi retirada com o auxílio de uma colher pequena, até 2 cm de profundidade aproximadamente, então o substrato exposto foi coletado, também com a colher. No caso dos tratamentos com tomates, as raízes não foram coletadas junto com a amostra, somente o substrato (Figura 5). O restante do substrato foi coletado para as análises bioquímicas.

Para reduzir a variabilidade, a coleta de substrato foi feita na mesma posição para todos os vasos, dessa forma o solo coletado estava sempre à esquerda das marcações feitas com as colheres, como mostrado na imagem abaixo. Na coleta 45 DAP, foram selecionados aleatoriamente 4 vasos de cada tratamento para amostragem do substrato, e na coleta 60 DAP foram amostrados os 4 vasos restantes. As amostras de substrato coletadas para as análises metabolômicas foram armazenadas em -80°C até o momento da análise.



Figura 5. Fotos da coleta de amostras de substrato. a) Local de coleta dos tratamentos sem tomate; b) Local de coleta dos tratamentos com tomate; c) Tubo plástico onde foi armazenado o substrato coletado para análise metabolômica.

3.5. ANÁLISES BIOMÉTRICAS

As análises biométricas das plantas de tomate foram realizadas somente para a coleta de 45 DAP. Após a amostragem do substrato, as plantas foram retiradas dos vasos e dispostas sobre a bancada para medição de altura de parte aérea e comprimento de raiz, a medida foi feita com auxílio de régua.

Em seguida, foi feita lavagem em água corrente das raízes para retirada do substrato e depois a planta foi separada em parte aérea e sistema radicular. Cada uma das partes foi então colocada em sacos de papel para secagem em estufa de circulação de ar a 40 °C até peso constante. A biomassa seca foi então pesada em balança analítica e os resultados foram anotados.

3.6. ANÁLISES BIOQUÍMICAS

3.6.1. Atividade Enzimática da β -Glicosidase

A determinação da atividade da β -glicosidase foi feita pesando 1 g de amostra de solo em frasco Erlenmeyer de 25 ml, em seguida foi adicionado 4 mL de tampão universal modificado (MUB) e 1 ml de solução de p-nitrofenil sulfato de potássio (pNS) 50 mM preparada no tampão. Os frascos foram fechados, agitados manualmente e incubados em estufa do tipo BOD por 1 hora a 37 °C. Após este período, foi imediatamente adicionado 1 ml de CaCl_2 0,5 M e 4,0 ml de tampão tris(hidroximetil)aminometano (THAM 0,1 M pH 12), seguido de agitação. O meio reacional foi então filtrado em papel de filtro qualitativo, e a quantidade de p-nitrofenol (pNP) presente no filtrado foi determinada colorimetricamente em espectrofotômetro ajustado para $\lambda = 410$ nm e com o auxílio de uma curva padrão preparada com quantidades conhecidas de p-nitrofenol (pNP) (Mendes *et al.*, 2019; Tabatabai, 1994).

3.6.2. Atividade Enzimática da Arilsulfatase

A atividade arilsulfatase foi obtida a partir de 1g de amostra de solo pesado em frascos Erlenmeyers de 50 ml. Em seguida, foi adicionado 4 ml de tampão acetato de sódio (pH 5,8) e 1 ml de solução de p-nitrofenil sulfato de potássio (pNS) 50 mM preparada no tampão. Os frascos foram fechados, agitados manualmente e incubados por 1 hora a 37 °C em BOD. Após este período, foram adicionados 1 ml de CaCl_2 0,5 M e 4,0 ml de NaOH 0,5 M seguido de agitação. O meio reacional foi

filtrado em papel de filtro qualitativo, e a quantidade de p-nitrofenol (pNF) presente no filtrado determinada colorimetricamente em espectrofotômetro ajustado para $\lambda = 410$ nm e com o auxílio de uma curva padrão preparada com quantidade conhecidas de pNP (Mendes *et al.*, 2019; Tabatabai, 1994).

3.6.3. Carbono da Biomassa Microbiana (C-BMS)

As determinações do carbono da biomassa microbiana (C-BMS) foram realizadas seguindo o método de fumigação-extração (Vance *et al.*, 1987), onde os teores de carbono lábil dos extratos de cada amostra (fumigada e não fumigada) foram quantificados após leitura no espectrofotômetro a $\lambda = 495$ nm, após oxidação com Mn^{3+} (Bartlett; Ross, 1988). A partir destes resultados, foram calculados os valores de biomassa microbiana do solo (C-BMS) pelas diferenças entre o carbono lábil das amostras fumigadas subtraído do valor de carbono lábil das amostras não fumigadas com auxílio da equação abaixo:

$$C - BMS \left(\frac{mg\ C}{Kg\ amostra} \right) = FC/Kc$$

onde FC – diferença entre a quantidade de C ($mg\ kg^{-1}$) recuperada no extrato da amostra fumigada e a quantidade de C ($mg\ kg^{-1}$) recuperada da amostra não fumigada, e Kc – fator de correlação 0,33 utilizado para expressar a fração de C-BMS recuperada (Sparling; West, 1988).

3.6.4. Respiração Basal do Solo (RBS)

A determinação da respiração basal (RBS) das amostras de solo foi obtida segundo Silva *et al.* (2007). Primeiro, 2 frascos de vidro de 100 ml foram acondicionados em um frasco de vidro maior (5 L), onde um dos frascos continha 50 g da amostra de solo e o outro continha 10 ml de solução NaOH 1 M, fechando-se imediatamente o frasco maior. Frascos de 5 L contendo apenas o frasco menor com a solução de NaOH foram montados para obtenção de solução controle (ou branco). Os sistemas foram então incubados em temperatura ambiente ao abrigo da luz por 7 dias, e ao final deste período aos frascos (100 ml) com as soluções de NaOH foram adicionados de 2 ml de solução $BaCl_2$ 10% (m/v) e levadas a titulação com solução de HCl 0,5 M. Os valores de respiração basal do solo foram obtidos com auxílio da seguinte fórmula:

$$RBS\left(\frac{mg\ C-CO_2}{kg\ amostra \cdot h}\right) = [(Vb - Va * M * 6 * 1000)/Ps]/T$$

onde Vb – o volume, em mL, de HCl gasto na titulação do controle; Va – o volume, em ml, de HCl gasto na titulação da amostra; M – a molaridade exata do HCl; Ps – a massa seca, em g, da amostra de solo; e T – o tempo, em horas, de incubação das amostras.

A partir dos valores de C-BMS e RBS, foram determinados os valores de quociente metabólico (qCO_2) pela razão entre a respiração basal do solo por unidade de carbono da biomassa microbiana do solo (Silva *et al.*, 2007).

3.7. EXTRAÇÃO DE METABÓLITOS DO SOLO

Para a extração foram pesados 1 g da amostra de substrato em tubos falcon de 50 mL, em seguida foi adicionado 5 mL de água ultrapura. A mistura foi agitada vigorosamente utilizando vórtex por 1 minuto e, em seguida, centrifugada por 10 minutos a 9000 rpm, o sobrenadante obtido foi transferido para um novo tubo. Então, foi adicionado 10 mL de acetato de etila e novamente agitado em vórtex por 1 minuto. Após, foi feita a coleta de 5 mL da fase superior e colocada em novo tubo, neste foi feita a secagem completa da amostra em speed vac por aproximadamente 1 hora.

A seguir foi feita a derivatização, etapa necessária para o uso de GC-MS. Foi adicionado 1 mL de acetonitrilo ao tubo falcon de 50 mL contendo as amostras secas, seguido de ultrassom por 10 minutos. Depois foi adicionado 50 µL de uma solução de metoxiamina em piridina 20 mg mL⁻¹ e foi incubada por 1 hora em banho-maria a 80 °C. Por fim foi feita a adição de 50 µL de n-metil-n-(trimetilsilil)trifluoroacetamida (MSTFA) e incubada em shaker sem agitação a 37 °C por 30 minutos. As amostras foram então filtradas em filtro de seringa de nylon com poro 0,22 µm e colocadas em vial para serem analisadas no GC-MS.

3.8. DETERMINAÇÃO DE METABÓLITOS POR GC-MS (cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas)

Alíquotas de 1 µL das amostras derivatizadas foram injetadas no equipamento GC-MS QP2010SE (SHIMADZU) equipado com uma coluna capilar

RTX- 5MS RESTEK (30 m, Ø 0,25 mm ID, espessura de filme de 0,2 µm), detector de ionização de chama (CG-DIC) e injetor AOC-5000.

A separação dos compostos foi realizada com a temperatura do injetor de 270 °C, utilizando hélio como gás de arraste a um fluxo de 1,0 mL min⁻¹. A temperatura da coluna foi mantida em 70 °C por 2 minutos, seguido de um aumento de temperatura de 40 °C min⁻¹ até atingir 320 °C, sendo essa temperatura mantida por 1 minuto. As temperaturas da linha de transferência e da fonte de íons foram 250 °C e 200 °C, respectivamente. Os íons foram gerados por um feixe de elétrons de 70 eV a uma corrente de ionização de 2,0 mA. Foram registrados 30 espectros/segundo na faixa de massa de 40-700 m/z.

3.9. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para os dados biométricos e bioquímicos a análise de variância (ANOVA) foi aplicada para identificar diferenças entre as variáveis de resposta e havendo diferenças significativas, foi aplicado o teste Tukey ($p < 0.05$). As análises foram conduzidas com auxílio do programa SASM-Agri (Canteri *et al.*, 2001).

Para análise dos dados de metabolômica do solo foi utilizado o software R (versão 4.3.0) com os pacotes xcms, MSnbase e MsExperiment. Os arquivos de dados brutos, convertidos para o formato .mzML foram processados seguindo uma sequência de etapas. A primeira foi a detecção de picos cromatográficos (*peak picking*), realizada com o método de *Matched Filter* com as seguintes configurações: binSize = 0.1 (especificando a largura dos compartimentos/fatias na dimensão m/z), impute = "none" (sem interpolação linear), fwhm = 5 (full width at half maximum, reflete a largura média esperada dos picos), steps = 2 (número de compartimentos a serem mesclados antes da filtragem), max = 500 (número máximo de picos que são esperados/serão identificados por fatia), snthresh = 2 (limiar mínimo de razão sinal/ruído para a detecção de um pico), mzdif = 0.5 (diferença mínima em m/z para picos com tempos de retenção sobrepostos) e index = FALSE (especificando se índices devem ser retornados em vez de valores para m/z e tempos de retenção).

Em seguida, foi realizado o agrupamento de cromatogramas com o objetivo de agrupar os picos detectados em diferentes amostras que possuíam valores similares de m/z e tempo de retenção, e depois procedeu-se com o alinhamento dos cromatogramas para corrigir variações sistemáticas no tempo de retenção entre as

amostras. Posteriormente os picos foram reagrupados considerando os tempos de retenção corrigidos, o que permite um refinamento na correspondência dos picos entre as amostras. E por fim, a matriz de intensidades foi construída com o preenchimento de valores ausentes (*missing values*), essa etapa busca extrair, nos cromatogramas brutos, os sinais de picos que foram detectados em algumas amostras, mas estavam ausentes em outras, contribuindo para uma matriz de dados mais completa e comparável.

Com a matriz de dados processada e refinada no ambiente R, a análise estatística e exploratória seguiu para a plataforma MetaboAnalyst 6.0 (<https://www.metaboanalyst.ca>) (Pang *et al.*, 2024), onde foi conduzido o pré-processamento complementar, incluindo a filtragem de variáveis de baixa variância e a normalização por escalonamento (*autoscaling*). A partir disso, foram aplicadas abordagens estatísticas multivariadas e univariadas, como a análise de variância (ANOVA), utilizada para identificar metabólitos diferencialmente expressos entre os tratamentos. O gráfico gerado apresenta o valor de significância estatística transformado em escala $-\log_{10}(p)$, permitindo a visualização clara dos metabólitos com maior relevância estatística.

A análise de Fold Change (Log₂FC), que permite identificar variações relativas nos níveis dos metabólitos entre 2 tratamentos aplicados. O gráfico de dispersão gerado apresenta cada metabólito como um ponto, com o eixo Y indicando a magnitude da variação em escala logarítmica. Valores positivos de Log₂FC representam aumento na concentração dos metabólitos, enquanto valores negativos indicam redução. Essa abordagem permitiu destacar potenciais alterações metabólicas associadas ao tratamento estudado.

A análise orthoPLS-DA (Orthogonal Partial Least Squares Discriminant Analysis) foi empregada com o objetivo de identificar padrões de variação nos perfis metabólicos entre 2 grupos experimentais. Trata-se de uma abordagem estatística supervisionada que permite maximizar a separação entre as classes ao mesmo tempo em que remove a variação não relacionada com essa separação. Os resultados obtidos foram visualizados por meio de *scores plot*, que evidenciam a separação entre os grupos, e *VIP scores* (Variable Importance in Projection), que indicam os metabólitos com maior contribuição para o modelo.

Após a análise estatística e exploratória realizada no MetaboAnalyst, os recursos metabólicos de interesse foram submetidos a uma etapa de identificação putativa, com o objetivo de atribuir nomes ou classes químicas aos picos detectados. Essa identificação foi conduzida por meio da plataforma Global Natural Products Social Molecular Networking (GNPS) (<https://gnps.ucsd.edu>), que permite a comparação de espectros de fragmentação (MS/MS) com bibliotecas públicas de compostos conhecidos (Wang *et al.*, 2016).

Os dados foram filtrados removendo todos os íons de fragmentação MS/MS situados a ± 17 Da do m/z do íon precursor. Os espectros MS/MS foram submetidos a um filtro por janela, mantendo apenas os 6 íons de fragmentação mais intensos em uma faixa de ± 50 Da ao longo de todo o espectro. A tolerância de massa para o íon precursor foi definida em 20000 Da, enquanto a tolerância para os íons de fragmentação MS/MS foi fixada em 0,5 Da. Os espectros de biblioteca também foram submetidos aos mesmos critérios de filtragem aplicados aos dados experimentais. Para que uma correspondência entre um espectro da rede e um espectro da biblioteca fosse considerada válida, foi exigido um escore mínimo de 0,5 e pelo menos 6 picos coincidentes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. ANÁLISES BIOMÉTRICAS

Na Figura 6 pode ser observado que nos tratamentos com a presença de biomaterial e a 70% C.C. ou a 50% C.C. as plantas se desenvolveram mais e as raízes são mais volumosas em comparação com as plantas dos tratamentos com ausência de biomaterial a 70% C.C. e a 50% C.C., onde as plantas estão menores, com menor área foliar e com raízes mais finas.



Figura 6. Foto das plantas de tomate coletadas a 45 DAP.

Os resultados mostram que a presença do biomaterial teve influência positiva no desenvolvimento da planta, com aumento médio significativo na altura da parte aérea (aprox. 83%) e na biomassa seca da parte aérea (aprox. 463%). O comprimento de raiz apresentou dados estatísticos semelhantes entre si, porém o biomaterial estimulou a produção de raízes secundárias, pois houve aumento significativo de biomassa seca da raiz (275%) (Tabela 3).

Em relação a umidade do solo, não foram observadas diferenças significativas, o que pode ser explicado pelo tempo reduzido de exposição ao déficit hídrico ou à baixa diferença de disponibilidade hídrica entre os tratamentos. Em situações extremas, por exemplo, poderia ser possível observar melhores resultados, como ocorreu no experimento de Alves *et al.* (2021), em que plantas de soja com déficit hídrico de 0-20% (100-80% C.C.) tiveram baixa diferença na altura de planta em relação aos tratamentos de 20-40% (80-60% C.C.), porém quando comparadas com plantas sob 80-100% de déficit (0-20% C.C.) a diferença chega a 52% no inverno e 39% no verão. O mesmo foi observado quando comparada a profundidade máxima da raiz, com aumento entre os déficits de 0-20% e 80-100% de 44% no inverno e 40% no verão.

A aplicação de materiais orgânicos no solo pode alterar de forma significativa a estrutura da comunidade microbiana do solo, trazendo um aumento na diversidade de microrganismos e na degradação da MOS, deixando os nutrientes disponíveis de forma mais rápida (Feng *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2019), assim o maior desenvolvimento das plantas de tomate na presença do biomaterial pode ter influência da microbiota do solo que, teve sua atividade influenciada pela adição do biomaterial.

Altura de Parte Aérea (cm)			Comprimento de Raiz (cm)		
Tratamento	Média	Tukey (5%)	Tratamento	Média	Tukey (5%)
C/ Tomate C/ Material 70%	29,00	a	C/ Tomate S/ Material 70%	27,00	a
C/ Tomate C/ Material 50%	28,00	a	C/ Tomate C/ Material 70%	22,00	ab
C/ Tomate S/ Material 50%	16,00	b	C/ Tomate S/ Material 50%	19,33	b
C/ Tomate S/ Material 70%	15,00	b	C/ Tomate C/ Material 50%	18,00	b
C.V. 3,94%			C.V. 13,37%		

Biomassa Seca de Parte Aérea (g)			Biomassa Seca Raiz (g)		
Tratamento	Média	Tukey (5%)	Tratamento	Média	Tukey (5%)
C/ Tomate C/ Material 70%	0,54	a	C/ Tomate C/ Material 50%	0,31	a
C/ Tomate C/ Material 50%	0,53	a	C/ Tomate C/ Material 70%	0,29	a
C/ Tomate S/ Material 50%	0,11	b	C/ Tomate S/ Material 70%	0,09	b
C/ Tomate S/ Material 70%	0,08	b	C/ Tomate S/ Material 50%	0,07	b
C.V. 11,45%			C.V. 11,02%		

Tabela 3. Parâmetros de altura da parte aérea, comprimento de raiz, biomassa seca de parte aérea e biomassa seca de raiz, para coleta de 45 DAP. Dados apresentados referem-se a média de 3 plantas.

4.2. ATIVIDADE ENZIMÁTICA DO SOLO

4.2.1. β -Glicosidase

Os resultados obtidos da coleta 45 DAP apresentaram maior atividade de β -glicosidase nos tratamentos com tomate, com e sem biomaterial. Enquanto os tratamentos sem tomate, obtiveram menor atividade enzimática. Na coleta aos 60 DAP houve uma inversão desse quadro, com os maiores valores de atividade enzimática nos tratamentos sem tomate. Quanto ao déficit hídrico e a presença do biomaterial não houve diferença estatística entre os tratamentos.

O efeito da planta, na primeira coleta, provavelmente se dá pelo crescimento radicular e liberação de exsudatos no solo que são consumidos pela microbiota refletindo em maior atividade enzimática (Singha e Pandey, 2021). Entretanto, na

segunda coleta esse efeito não foi observado, talvez pela limitação de nutrientes, promovida pelo consumo da planta para suprimento do seu metabolismo.

β -Glicosidase				Coleta 60 DAP ($\mu\text{g de PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)			
Coleta 45 DAP ($\mu\text{g de PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)				Coleta 60 DAP ($\mu\text{g de PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)			
Tratamento	Média	Tukey (5%)		Tratamento	Média	Tukey (5%)	
C/ Tomate C/ Material 70%	17,613	a		S/ Tomate S/ Material 50%	23,063	a	
C/ Tomate C/ Material 50%	17,103	ab		S/ Tomate S/ Material 70%	21,580	ab	
C/ Tomate S/ Material 50%	16,870	ab		S/ Tomate C/ Material 70%	18,183	abc	
C/ Tomate S/ Material 70%	16,463	ab		C/ Tomate C/ Material 50%	16,007	bc	
S/ Tomate C/ Material 50%	14,637	bc		C/ Tomate S/ Material 50%	14,453	c	
S/ Tomate C/ Material 70%	12,520	c		C/ Tomate S/ Material 70%	13,590	c	
S/ Tomate S/ Material 70%	12,250	c		C/ Tomate C/ Material 70%	12,780	c	
S/ Tomate S/ Material 50%	12,210	c		S/ Tomate C/ Material 50%	12,197	c	
C.V. 6,32%				C.V. 14,40%			

Tabela 4. Atividade enzimática da β -glicosidase em solo, nas coletas de 45 DAP e 60 DAP. Dados referem-se a média de 3 amostras de solo.

4.2.2. Arilsulfatase

Para a coleta 45 DAP, os tratamentos sem tomate apresentaram maior atividade de arilsulfatase quando comparados aos tratamentos com tomate, sendo estes últimos iguais entre si. Quando na presença de biomaterial e a 50% C.C. a atividade foi maior, já a 70% C.C. a atividade foi um pouco menor, seguido dos tratamentos onde não foi adicionado biomaterial, que não apresentaram diferença em relação ao déficit.

Para a coleta 60 DAP, os tratamentos sem tomate tiveram redução na atividade em relação a coleta 45 DAP, possivelmente pela limitação de nutrientes no sistema.

Arilsulfatase				Coleta 60 DAP ($\mu\text{g de PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)			
Coleta 45 DAP ($\mu\text{g de PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)				Coleta 60 DAP ($\mu\text{g de PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)			
Tratamento	Média	Tukey (5%)		Tratamento	Média	Tukey (5%)	
S/ Tomate C/ Material 50%	257,063	a		C/ Tomate C/ Material 70%	32,117	a	
S/ Tomate C/ Material 70%	216,733	b		S/ Tomate S/ Material 50%	31,223	ab	
S/ Tomate S/ Material 70%	169,550	c		C/ Tomate C/ Material 50%	28,523	ab	
S/ Tomate S/ Material 50%	163,617	c		C/ Tomate S/ Material 70%	27,147	ab	
C/ Tomate C/ Material 50%	34,007	d		C/ Tomate S/ Material 50%	27,103	ab	
C/ Tomate C/ Material 70%	26,337	d		S/ Tomate C/ Material 70%	26,090	ab	
C/ Tomate S/ Material 50%	24,563	d		S/ Tomate C/ Material 50%	24,190	ab	
C/ Tomate S/ Material 70%	23,057	d		S/ Tomate S/ Material 70%	23,280	b	
C.V. 10,53%				C.V. 11,03%			

Tabela 5. Atividade enzimática de arilsulfatase em solo, nas coletas de 45 DAP e 60 DAP. Dados referem-se a média de 3 amostras de solo.

4.3. RESPIRAÇÃO BASAL DO SOLO (RBS)

Para a coleta 45 DAP, os tratamentos com tomate apresentaram maiores valores para RBS, em comparação aos tratamentos sem planta, que obtiveram os menores valores, indicando uma elevada atividade dos microrganismos no solo em resposta ao plantio do tomate, resultando na maior produção de CO₂. Para a coleta 60 DAP, esse quadro se inverte e na ausência de tomate a respiração é maior. Esse resultado foi semelhante à atividade enzimática da β -glicosidase, possivelmente pois ela influencia diretamente na quantidade de carbono disponível para a respiração microbiana e quanto maior a atividade da enzima, maior a liberação de CO₂. Não foi observado efeito de biomaterial ou de déficit hídrico.

RBS			RBS		
Coleta 45 DAP (mg de C-CO ₂ Kg ⁻¹ h ⁻¹)			Coleta 60 DAP (mg de C-CO ₂ Kg ⁻¹ h ⁻¹)		
Tratamento	Média	Tukey (5%)	Tratamento	Média	Tukey (5%)
C/ Tomate S/ Material 70%	1,883	a	S/ Tomate C/ Material 70%	2,313	a
C/ Tomate S/ Material 50%	1,726	ab	S/ Tomate C/ Material 50%	2,225	a
C/ Tomate C/ Material 50%	1,632	ab	S/ Tomate S/ Material 70%	2,119	a
C/ Tomate C/ Material 70%	1,269	bc	S/ Tomate S/ Material 50%	1,659	ab
S/ Tomate S/ Material 50%	0,717	cd	C/ Tomate C/ Material 50%	0,822	bc
S/ Tomate S/ Material 70%	0,396	d	C/ Tomate C/ Material 70%	0,554	c
S/ Tomate C/ Material 70%	0,331	d	C/ Tomate S/ Material 70%	0,360	c
S/ Tomate C/ Material 50%	0,287	d	C/ Tomate S/ Material 50%	0,217	c
C.V. 20,90%			C.V. 23,44%		

Tabela 6. Respiração basal do solo, nas coletas de 45 DAP e 60 DAP. Dados referem-se a média de 3 amostras de solo.

4.4. CARBONO DA BIOMASSA MICROBIANA (BMS-C)

Os resultados dessa análise não apresentaram efeito de planta tanto na coleta de 45 DAP quanto na de 60 DAP. O biomaterial e o déficit hídrico também não indicam efeito. Quando comparado com a atividade de β -Glicosidase os resultados são conflitantes, provavelmente porque a fonte de energia da microbiota não está vindo de moléculas com β -ligações (ex.: celulose e hemicelulose), logo a atividade dessa enzima não reflete totalmente a atividade da microbiota.

BMS-C				Coleta 60 DAP ($\mu\text{g C g}^{-1}$ solo)			
Coleta 45 DAP ($\mu\text{g C g}^{-1}$ solo)				Coleta 60 DAP ($\mu\text{g C g}^{-1}$ solo)			
Tratamento		Média	Tukey (5%)	Tratamento		Média	Tukey (5%)
S/ Tomate S/ Material	70%	808,340	a	C/ Tomate S/ Material	70%	633,077	a
S/ Tomate C/ Material	70%	774,147	a	C/ Tomate S/ Material	50%	403,807	ab
C/ Tomate C/ Material	50%	667,310	ab	S/ Tomate C/ Material	50%	387,873	ab
S/ Tomate S/ Material	50%	645,733	abc	S/ Tomate S/ Material	70%	357,483	ab
C/ Tomate C/ Material	70%	614,853	abc	C/ Tomate C/ Material	50%	296,743	ab
S/ Tomate C/ Material	50%	540,947	abc	S/ Tomate C/ Material	70%	260,237	b
C/ Tomate S/ Material	50%	432,580	bc	C/ Tomate C/ Material	70%	231,350	b
C/ Tomate S/ Material	70%	348,227	c	S/ Tomate S/ Material	50%	205,353	b
C.V. 18,39%				C.V. 36,05%			

Tabela 7. Carbono de biomassa microbiana de solo, nas coletas de 45 DAP e 60 DAP. Dados referem-se a média de 3 amostras de solo.

4.5. QUOCIENTE METABÓLICO ($q\text{CO}_2$)

O Quociente Metabólico segue o mesmo padrão que a respiração basal e a atividade de β -glicosidase, na coleta 45 DAP a presença de tomate apresenta maiores valores quando comparado com a ausência de planta. Na coleta 60 DAP essa resposta se inverte. Também não foi observado efeito de biomaterial ou déficit hídrico.

$q\text{CO}_2$				Coleta 60 DAP ($\text{mgC-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ BMS-C h}^{-1}$)			
Coleta 45 DAP ($\text{mgC-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ BMS-C h}^{-1}$)				Coleta 60 DAP ($\text{mgC-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ BMS-C h}^{-1}$)			
Tratamento		Média	Tukey (5%)	Tratamento		Média	Tukey (5%)
C/ Tomate S/ Material	70%	7,775	a	S/ Tomate C/ Material	70%	9,223	a
C/ Tomate S/ Material	50%	4,032	ab	S/ Tomate S/ Material	50%	8,446	a
C/ Tomate C/ Material	50%	2,519	ab	S/ Tomate S/ Material	70%	6,053	ab
C/ Tomate C/ Material	70%	2,126	ab	S/ Tomate C/ Material	50%	5,779	ab
S/ Tomate S/ Material	50%	1,141	b	C/ Tomate C/ Material	50%	2,781	bc
S/ Tomate C/ Material	50%	0,578	b	C/ Tomate C/ Material	70%	2,515	bc
S/ Tomate S/ Material	70%	0,491	b	C/ Tomate S/ Material	50%	0,780	c
S/ Tomate C/ Material	70%	0,432	b	C/ Tomate S/ Material	70%	0,667	c
C.V. 96,88%				C.V. 36,38%			

Tabela 8. Quociente metabólico de solo, nas coletas de 45 DAP e 60 DAP. Dados referem-se a média de 3 amostras de solo.

4.6. ANÁLISES METABOLÔMICAS

A Figura 7 apresenta os cromatogramas das amostras onde é possível observar uma tendência de semelhança entre elas, com algumas variações de picos e intensidades. O Gráfico 1 apresenta a ANOVA realizada com todas as amostras, que indica a significância de 391 sinais (metabólitos) com maior potencial para diferenciar os tratamentos aplicados.

No Gráfico 2 está apresentado a análise de sPLS-DA, e nele é possível observar apenas a separação entre o branco e grupos com e sem tomate, não havendo diferença entre biomaterial e tratamento hídrico quando considerado a totalidade das amostras. Por esse motivo as próximas análises foram realizadas em grupos, sendo eles: Sem Tomate 45 DAP, Sem Tomate 60 DAP, Com Tomate 45 DAP e Com Tomate 60 DAP.

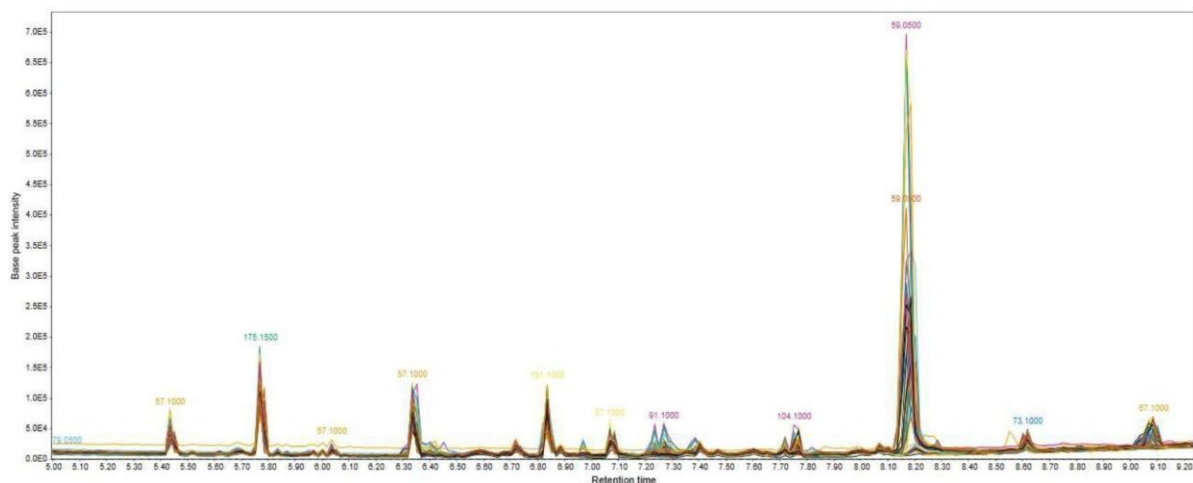


Figura 7. Cromatogramas de todas as amostras.

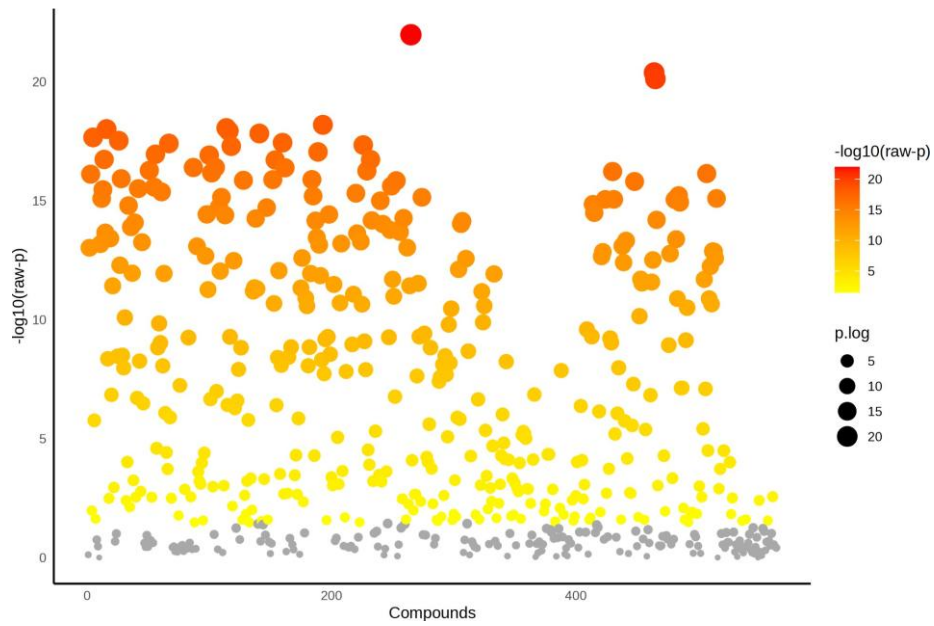


Gráfico 1. *Volcano plot* adaptado para ANOVA de todos os tratamentos.

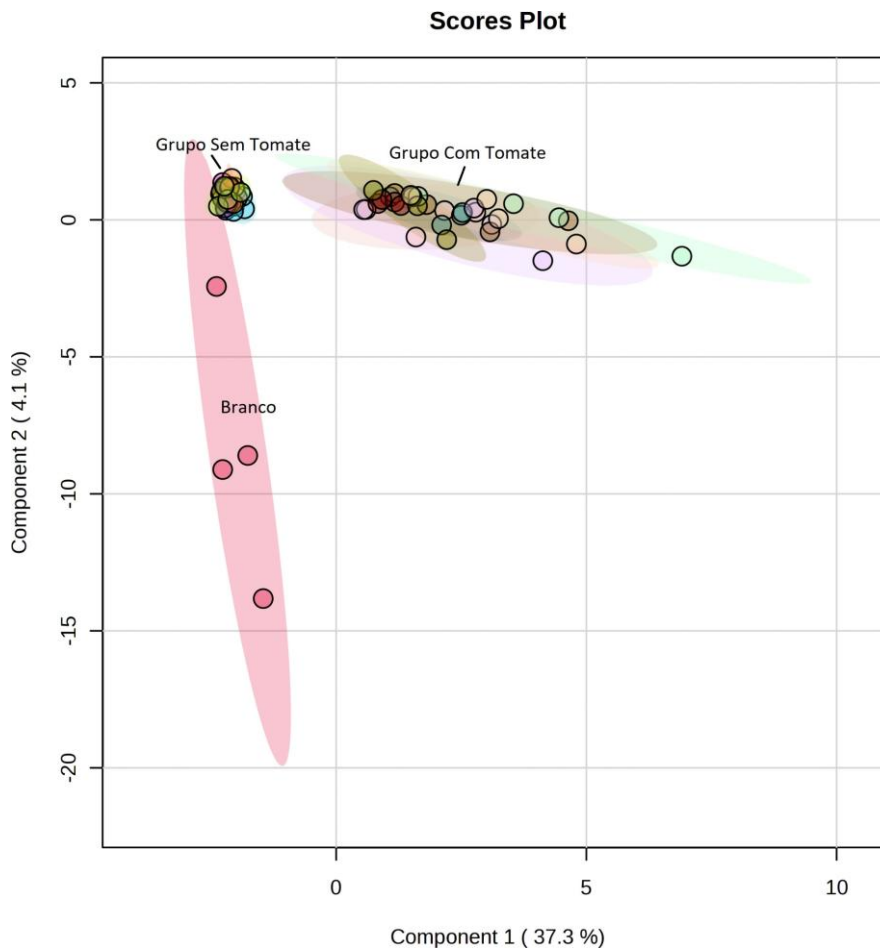


Gráfico 2. *Scores plot* da análise sPLS-DA de todos os tratamentos.

4.6.1. Tratamentos Sem Tomate da Coleta 45 DAP

O Gráfico 3 apresenta um *scores plot* da análise multivariada supervisionada sPLS-DA, mostrando a separação entre os tratamentos. O grupo 'Branco' está mais afastado evidenciando sua total diferença em relação às amostras. Já o restante dos tratamentos apresentam uma proximidade entre si.

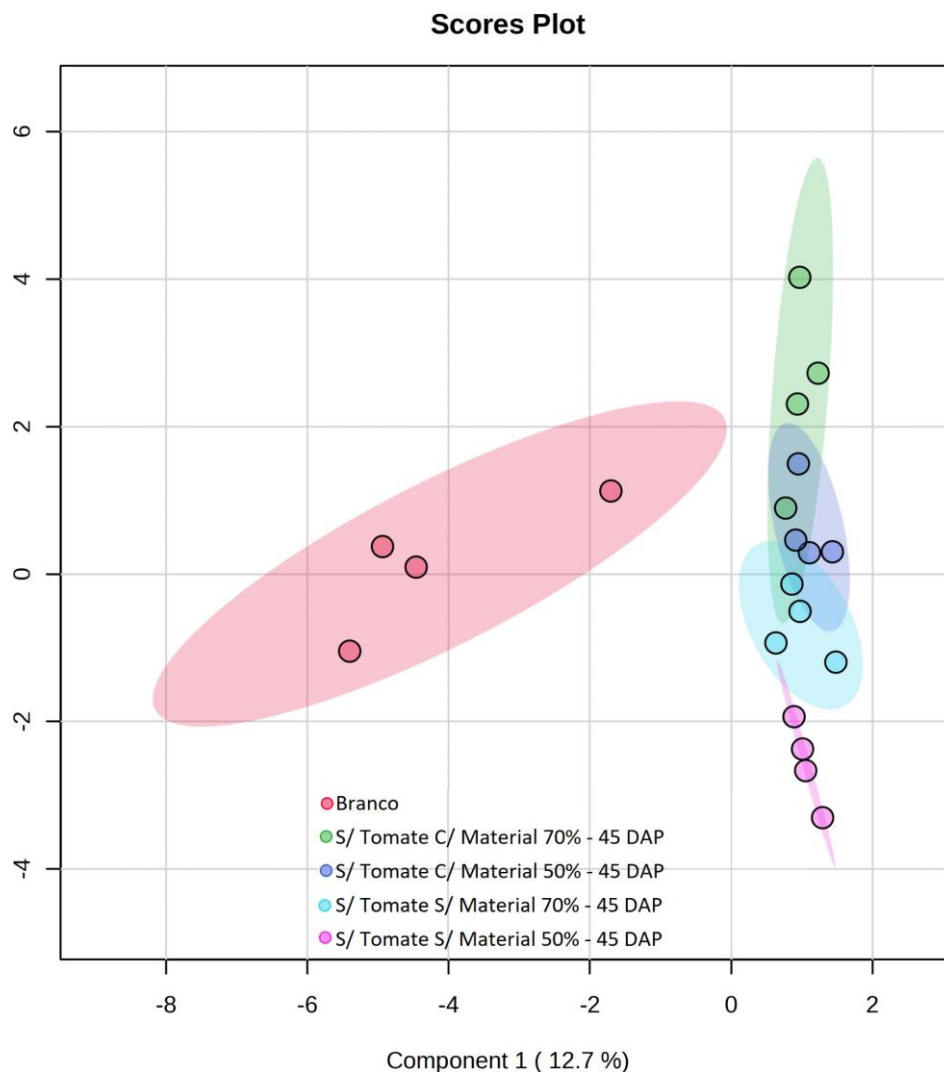


Gráfico 3. *Scores plot* da análise sPLS-DA dos tratamentos sem tomate na coleta 45 DAP.

A Tabela 9 e o Gráfico 4 mostram a análise de FC (Fold Change) feita pelo contraste entre os tratamentos sem tomate e com biomaterial a 70% e a 50% C.C. na coleta de 45 DAP. É possível observar que existem 29 sinais com maior presença nos tratamentos a 70% C.C. e, conseqüentemente, com menor presença a 50%, assim como existem 31 sinais com maior presença nos tratamentos a 50% C.C. e,

portanto, menos a 70%. Também foi realizada análise de orthoPLS-DA, com os mesmos tratamentos, onde o Gráfico 5 evidencia a diferença entre os grupos comprovando a influência do déficit hídrico no funcionamento do solo, e o Gráfico 6 traz os 30 sinais mais importantes para a diferenciação.

Sinal	log2 FC	Identificação	Sinal	log2 FC	Identificação
FT370	3,1633	Octadecil 3-(3,5-di-terc-butil-4-hidroxi-fenil)propanoato	FT009	-1,0253	Nonacosano
FT371	3,0399	Octadecil 3-(3,5-di-terc-butil-4-hidroxi-fenil)propanoato	FT503	-1,0795	(Z)-Docos-13-enamida
FT385	2,7696	Octadecil 3-(3,5-di-terc-butil-4-hidroxi-fenil)propanoato	FT506	-1,0825	(Z)-Docos-13-enamida
FT373	2,7581	Ácido glicerofosfórico tetratrimetilsililado	FT507	-1,0828	(Z)-Docos-13-enamida
FT386	2,7218	Éter isopropil-tetradecílico	FT505	-1,0937	(Z)-Docos-13-enamida
FT159	2,5459	(Z)-Docos-13-enamida	FT473	-1,1277	Ácido octadecanoico
FT383	2,4537	Ácido octadecanoico	FT258	-1,1393	Pentadecano
FT369	2,0655	Éter isopropil-tetradecílico	FT428	-1,1826	(Z)-Docos-13-enamida
FT144	2,0273	Ácido 3,4,5-triidroxibenzoico	FT509	-1,1857	(Z)-Docos-13-enamida
FT372	1,9339	Ácido hexadecanoico	FT510	-1,1857	(Z)-Docos-13-enamida
FT384	1,5054	Ácido octadecanoico	FT316	-1,2311	Dodecametilciclohexasiloxano
FT382	1,4892	Ácido 3,4-diidroximandélico	FT322	-1,2847	(Z)-Docos-13-enamida
FT458	1,3912	Dodecametilciclohexasiloxano	FT556	-1,3038	Dodecametilciclohexasiloxano
FT086	1,3703	(Z)-Docos-13-enamida	FT391	-1,3076	Ácido octadecanoico
FT529	1,2834	Dodecametilciclohexasiloxano	FT558	-1,3249	Dodecametilciclohexasiloxano
FT468	1,2676	Éter docosil-pentílico	FT284	-1,3598	Dodecametilciclohexasiloxano
FT336	1,2613	Octadecil 3-(3,5-di-terc-butil-4-hidroxi-fenil)propanoato	FT047	-1,3707	Octadecil 3-(3,5-di-terc-butil-4-hidroxi-fenil)propanoato
FT414	1,2535	(Z)-Docos-13-enamida	FT511	-1,3845	(Z)-Docos-13-enamida
FT415	1,2365	(Z)-Docos-13-enamida	FT142	-1,4871	Ácido 3,4,5-triidroxibenzoico
FT392	1,1451	Ácido octadecanoico	FT547	-1,4878	Dodecametilciclohexasiloxano
FT362	1,1414	Nonacosano	FT286	-1,4912	Dodecametilciclohexasiloxano
FT360	1,1297	1-Benzil-2-quinolona	FT285	-1,5522	Dodecametilciclohexasiloxano
FT443	1,1183	(Z)-Docos-13-enamida	FT486	-1,5885	(Z)-Docos-13-enamida
FT049	1,0905	Ácido hexadecanoico	FT527	-1,6014	Dodecametilciclohexasiloxano

FT441	1,0895	(Z)-Docos-13-enamida		FT462	-1,7252	(Z)-Docos-13-enamida
FT396	1,0839	Dodecametilciclohexasiloxano		FT562	-1,8259	Dodecametilciclohexasiloxano
FT560	1,0814	Dodecametilciclohexasiloxano		FT502	-1,9164	(Z)-Docos-13-enamida
FT053	1,0739	Ácido octadecanoico		FT487	-1,9295	(Z)-Docos-13-enamida
FT040	1,0208	Éter decil-heptílico		FT463	-3,4886	(Z)-Docos-13-enamida
				FT464	-3,6920	(Z)-Docos-13-enamida
				FT465	-3,7481	(Z)-Docos-13-enamida

Tabela 9. Metabólitos com maior variação de abundância entre os tratamentos sem tomate e com biomaterial na coleta 45 DAP.

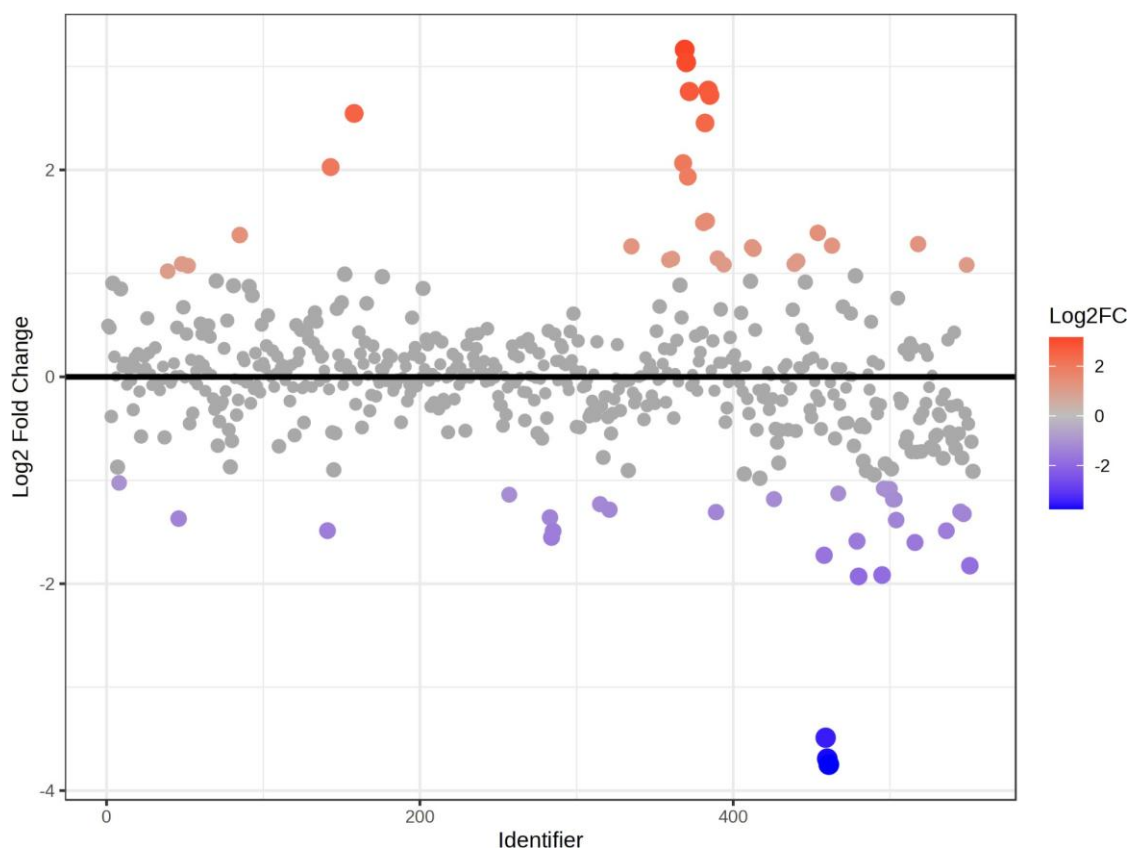


Gráfico 4. *Fold Change* dos tratamentos sem tomate e com biomaterial na coleta 45 DAP.

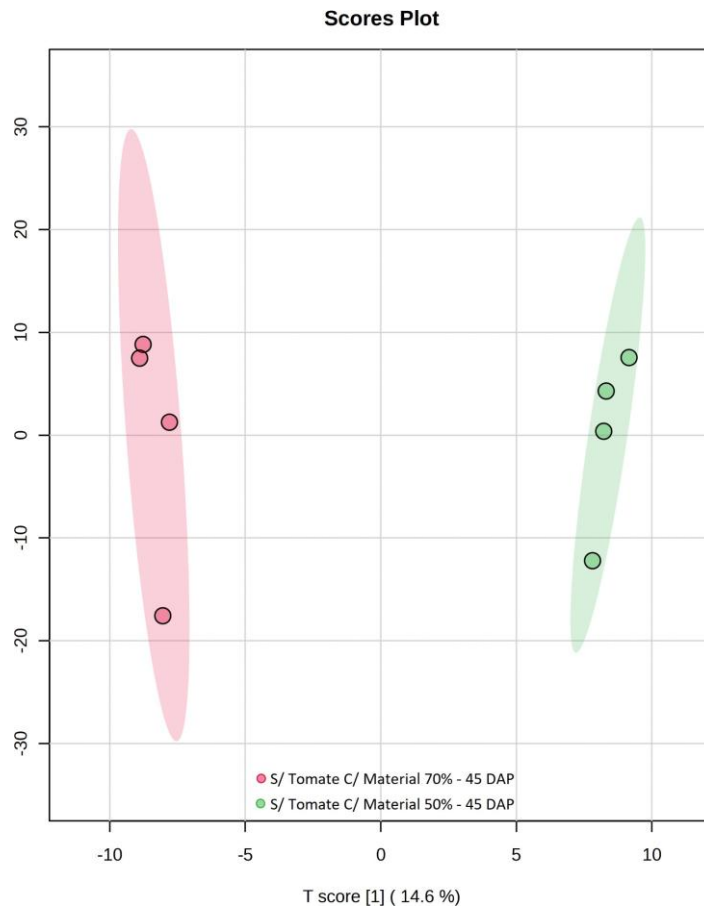


Gráfico 5. Scores plot da análise orthoPLS-DA dos tratamentos sem tomate e com biomaterial na coleta 45 DAP.

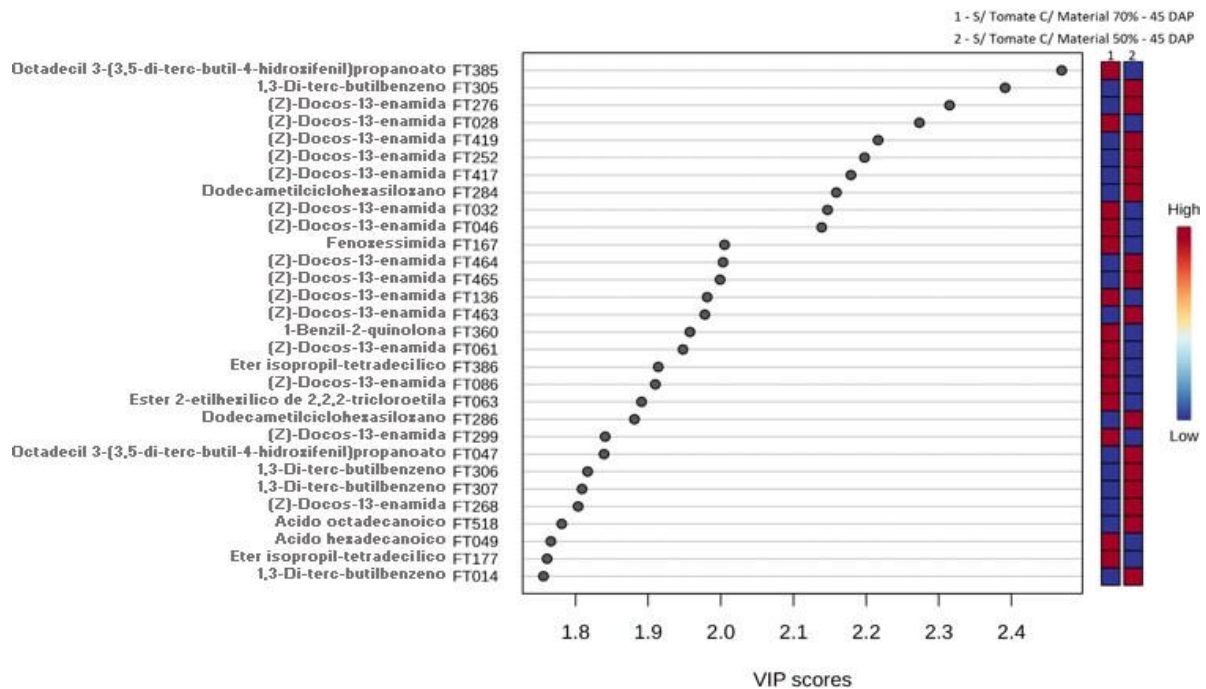


Gráfico 6. VIP score da análise orthoPLS-DA dos tratamentos sem tomate e com biomaterial na coleta 45 DAP.

A Tabela 10 e o Gráfico 7 mostram a análise de FC (Fold Change) feita pelo contraste entre os tratamentos sem tomate e sem biomaterial a 70% e a 50% C.C. na coleta de 45 DAP. Observa-se que existem 37 sinais com maior presença a 70% e 27 sinais com maior presença a 50%. Também foi realizada análise de orthoPLS-DA, com os mesmos tratamentos, onde o Gráfico 8 apresenta a diferença entre os grupos, mais uma vez evidenciando o efeito do tratamento hídrico, e o Gráfico 9 traz os 30 sinais mais importantes para a diferenciação entre esses tratamentos.

Sinal	log2 FC	Identificação	Sinal	log2 FC	Identificação
FT473	3,2067	Ácido octadecanoico	FT169	-1,0103	2-Fenilciclohexanol
FT468	2,9151	Éter docosil-pentílico	FT332	-1,0298	1,3-Di-terc-butilbenzeno
FT369	2,7731	Éter isopropil-tetradecílico	FT053	-1,0556	Ácido octadecanoico
FT165	2,6635	Fenoxessimida	FT318	-1,0910	(Z)-Docos-13-enamida
FT560	2,4547	Dodecametilciclohexasiloxano	FT490	-1,1004	(Z)-Docos-13-enamida
FT393	2,3910	Ácido 3,4,5-triidroxibenzoico	FT356	-1,2157	(Z)-Docos-13-enamida
FT394	2,3616	Éter docosil-pentílico	FT556	-1,2902	Dodecametilciclohexasiloxano
FT396	2,2948	Dodecametilciclohexasiloxano	FT558	-1,3888	Dodecametilciclohexasiloxano
FT548	2,0477	Dodecametilciclohexasiloxano	FT258	-1,3952	Pentadecano
FT391	1,9410	Ácido octadecanoico	FT509	-1,6683	(Z)-Docos-13-enamida
FT371	1,7961	1-Iodoctacosano	FT510	-1,6688	(Z)-Docos-13-enamida
FT561	1,7277	Dodecametilciclohexasiloxano	FT511	-1,6724	(Z)-Docos-13-enamida
FT049	1,6725	Ácido hexadecanoico	FT505	-1,6765	(Z)-Docos-13-enamida
FT383	1,6229	Ácido octadecanoico	FT503	-1,7030	(Z)-Docos-13-enamida
FT094	1,5843	Fenoxessimida	FT506	-1,7114	(Z)-Docos-13-enamida
FT469	1,5217	Éter isopropil-tetradecílico	FT507	-1,7114	(Z)-Docos-13-enamida
FT372	1,5210	Ácido hexadecanoico	FT502	-1,9712	(Z)-Docos-13-enamida
FT178	1,4443	3,5-Di-terc-butil-4-hidroxibenzaldéido	FT464	-2,0174	(Z)-Docos-13-enamida
FT211	1,4132	(Z)-Docos-13-enamida	FT562	-2,0520	Dodecametilciclohexasiloxano
FT550	1,4093	Dodecametilciclohexasiloxano	FT465	-2,1421	(Z)-Docos-13-enamida
FT092	1,3750	1-Iodoctacosano	FT142	-2,3441	Ácido 3,4,5-triidroxibenzoico
FT084	1,2760	(Z)-Docos-13-enamida	FT526	-2,3864	Dodecametilciclohexasiloxano

FT539	1,2727	Dodecametilciclohexasiloxano		FT527	-2,8497	Dodecametilciclohexasiloxano
FT066	1,2283	(Z)-Docos-13-enamida		FT528	-3,0378	Dodecametilciclohexasiloxano
FT302	1,1970	3,5-Di-terc-butil-4-hidroxibenzald eido		FT547	-3,0849	Dodecametilciclohexasiloxano
FT008	1,1702	Éter isopropil-tetradecílico		FT407	-3,4275	(Z)-Docos-13-enamida
FT552	1,1441	Dodecametilciclohexasiloxano		FT551	-5,0740	Dodecametilciclohexasiloxano
FT455	1,1194	(Z)-Docos-13-enamida				
FT360	1,1107	1-Benzil-2-quinolona				
FT392	1,0913	Ácido octadecanoico				
FT536	1,0809	Dodecametilciclohexasiloxano				
FT163	1,0693	(Z)-Docos-13-enamida				
FT501	1,0479	(Z)-Docos-13-enamida				
FT477	1,0382	(Z)-Docos-13-enamida				
FT482	1,0382	(Z)-Docos-13-enamida				
FT557	1,0350	Dodecametilciclohexasiloxano				
FT385	1,0276	Octadecil 3-(3,5-di-terc-butil-4-hi droxifenil)propanoato				

Tabela 10. Metabólitos com maior variação de abundância entre os tratamentos sem tomate e sem biomaterial na coleta 45 DAP.

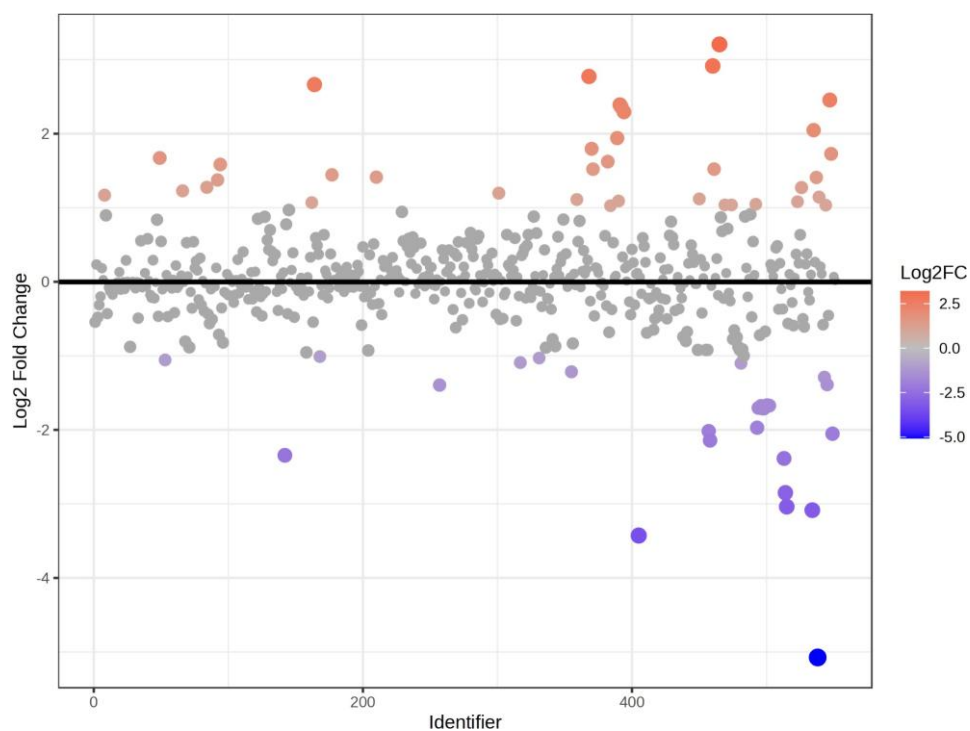


Gráfico 7. Fold Change dos tratamentos sem tomate e sem biomaterial na coleta 45 DAP.

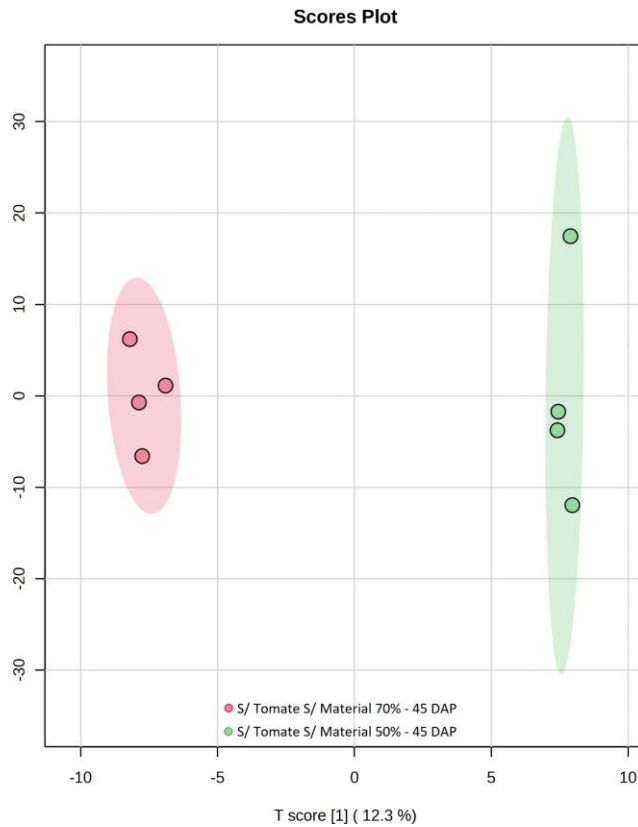


Gráfico 8. Scores plot da análise orthoPLS-DA dos tratamentos sem tomate e sem biomaterial na coleta 45 DAP.

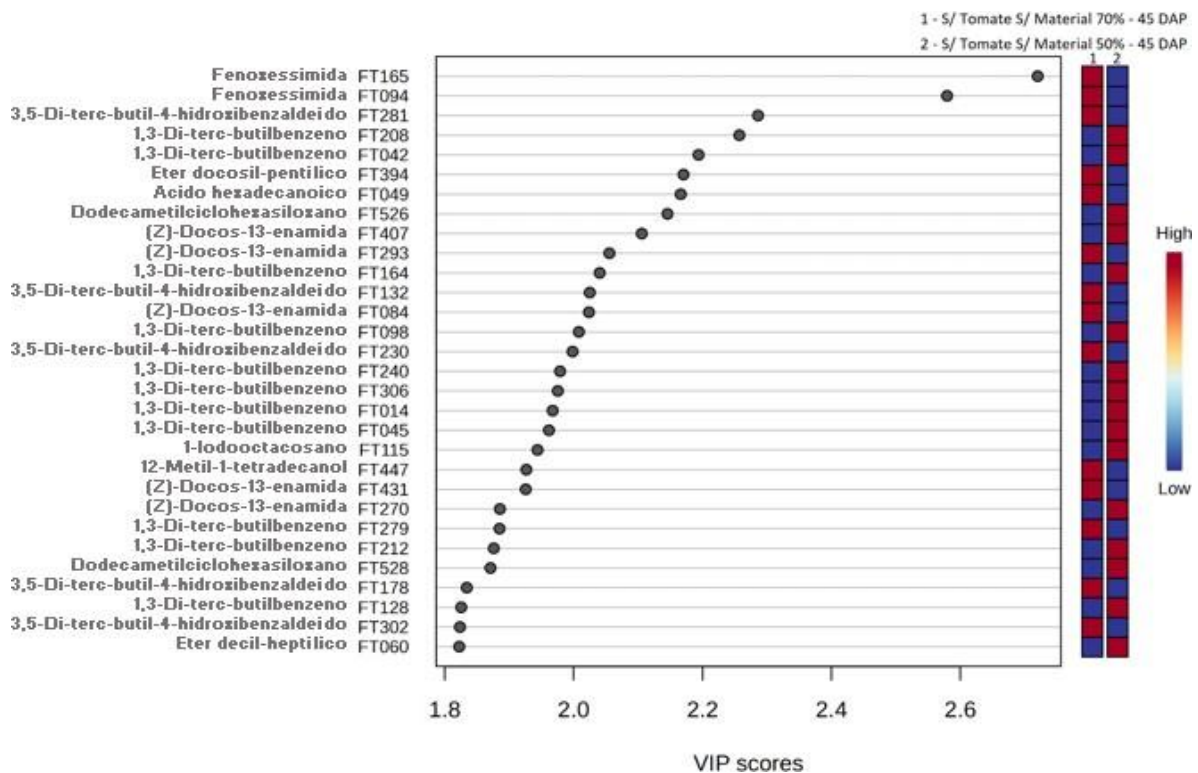


Gráfico 9. VIP score da análise orthoPLS-DA dos tratamentos sem tomate e sem biomaterial na coleta 45 DAP.

Os tratamentos com aplicação de biomaterial apresentaram uma baixa diferença de sinais mais expressos quando comparados a 70% e a 50% C.C. (29 x 31), no entanto, nos tratamento sem a aplicação do biomaterial a diferença é maior (37 x 27), sugerindo que o perfil metabólico sofreu maiores alterações na condição de déficit hídrico na ausência do biomaterial, ou seja, o biomaterial teve efeito de mitigação no impacto do déficit hídrico.

A condição de tratamento com o biomaterial a 70% apresenta um menor número de metabólitos significativamente alterados (29), quando comparado com o tratamento sem o biomaterial, também a 70% (37). Já a 50%, o número de metabólitos significativos é maior com a aplicação do biomaterial (31) e menor sem a aplicação (27), o que também sugere um efeito de redução do impacto do déficit hídrico.

Pelas Tabelas 9 e 10 é possível observar a repetição de metabólitos, isso sugere que o biomaterial e o estresse hídrico podem modular o comportamento metabólico, invertendo inclusive o padrão de alguns. Kosová *et al.* (2015) observaram uma regulação positiva ou negativa da biossíntese de determinados metabólitos induzida pelo estresse hídrico, indicando não apenas o efeito no conteúdo total de metabólitos, mas também no direcionamento de mudanças específicas em vias metabólicas cruciais para a manutenção da integridade celular e das funções fisiológicas sob condições adversas.

4.6.2. Tratamentos Sem Tomate da Coleta 60 DAP

O Gráfico 10 apresenta um *scores plot* da análise multivariada supervisionada sPLS-DA, mostrando a separação entre os grupos de tratamento. O grupo 'Branco' está mais afastado evidenciando sua total diferença em relação às amostras. É possível observar uma proximidade entre os tratamentos, o que sugere que com a remoção do déficit, feita após a coleta de 45 DAP, o solo teria seu funcionamento "normal" restaurado.

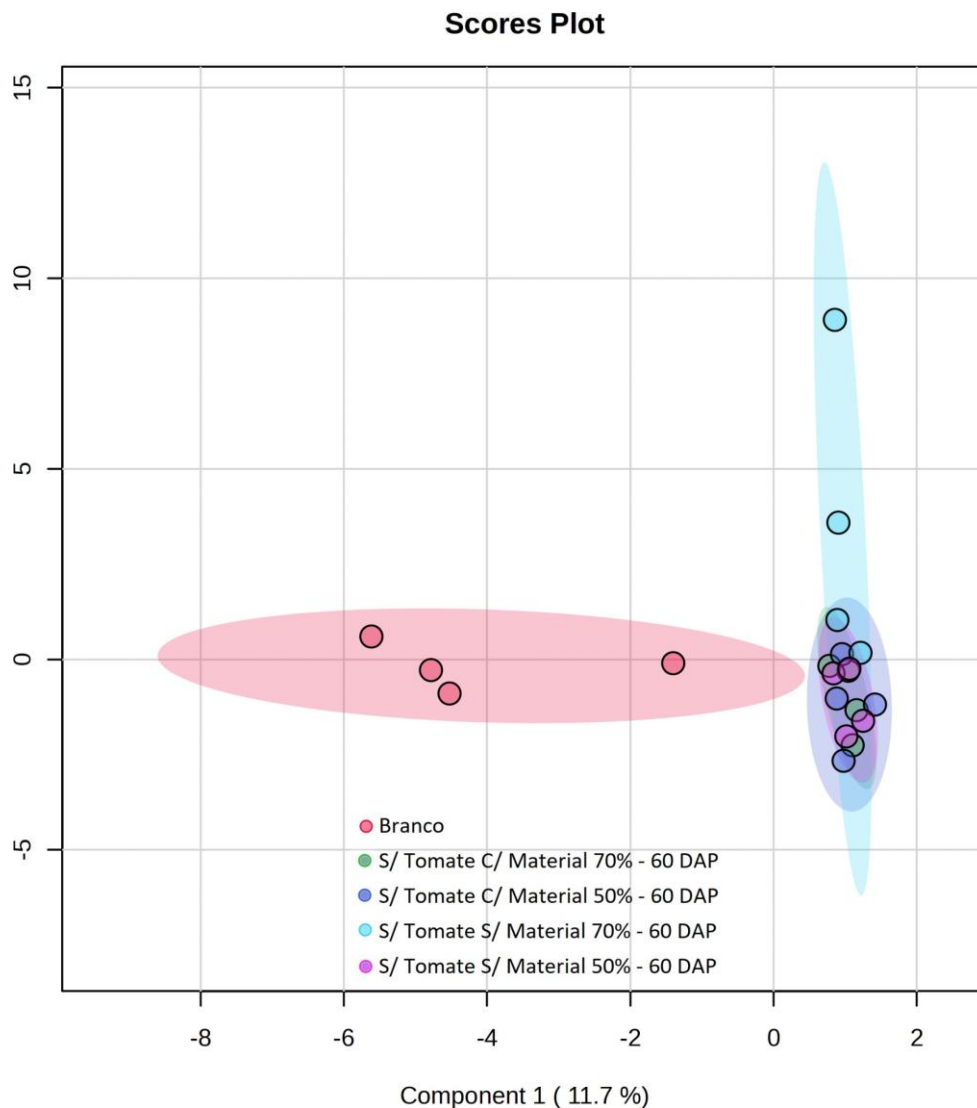


Gráfico 10. Scores plot da análise sPLS-DA dos tratamentos sem tomate na coleta 60 DAP.

A Tabela 11 e o Gráfico 11 mostram a análise de FC (Fold Change) feita pelo contraste entre os tratamentos sem tomate e com biomaterial a 70% e a 50% C.C. na coleta de 60 DAP. É possível observar que existem 63 sinais com maior presença nos tratamentos a 70% C.C. e, conseqüentemente, com menor presença a 50%, assim como existem 28 sinais com maior presença nos tratamentos a 50% C.C. e, portanto, menos a 70%. Também foi realizada análise de orthoPLS-DA, com os mesmos tratamentos, onde o Gráfico 12 evidencia a diferença entre os grupos comprovando a influência do déficit hídrico no funcionamento do solo mesmo após a restauração da umidade. O Gráfico 13 traz os 30 sinais mais importantes para a diferenciação.

Sinal	log2 FC	Identificação
FT546	5,7216	Dodecametilciclohexasiloxano
FT540	4,7840	Dodecametilciclohexasiloxano
FT541	4,3049	Dodecametilciclohexasiloxano
FT549	3,9723	Dodecametilciclohexasiloxano
FT144	3,7827	Ácido 3,4,5-triidroxibenzoico
FT370	3,6206	Octadecil 3-(3,5-di-terc-butil-4-hidroxi-fenil)propanoato
FT562	3,5722	Dodecametilciclohexasiloxano
FT525	3,5689	Dodecametilciclohexasiloxano
FT140	3,3966	Dodecametilciclohexasiloxano
FT555	3,1489	Dodecametilciclohexasiloxano
FT556	3,0969	Dodecametilciclohexasiloxano
FT558	2,9967	Dodecametilciclohexasiloxano
FT334	2,9919	Ácido 3,4,5-triidroxibenzoico
FT552	2,9671	Dodecametilciclohexasiloxano
FT497	2,9514	(Z)-Docos-13-enamida
FT371	2,8742	Octadecil 3-(3,5-di-terc-butil-4-hidroxi-fenil)propanoato
FT551	2,7419	Dodecametilciclohexasiloxano
FT496	2,6946	(Z)-Docos-13-enamida
FT498	2,6505	(Z)-Docos-13-enamida
FT543	2,6359	Dodecametilciclohexasiloxano
FT559	2,6229	Dodecametilciclohexasiloxano
FT458	2,6131	Dodecametilciclohexasiloxano
FT544	2,5297	Dodecametilciclohexasiloxano
FT473	2,4610	Ácido octadecanoico
FT344	2,2128	Ácido 3,4,5-triidroxibenzoico
FT553	2,1890	Dodecametilciclohexasiloxano
FT393	2,1519	Ácido 3,4,5-triidroxibenzoico
FT468	2,1178	Éter docosil-pentílico
FT536	2,0085	Dodecametilciclohexasiloxano

Sinal	log2 FC	Identificação
FT325	-1,0201	(Z)-Docos-13-enamida
FT321	-1,0264	(Z)-Docos-13-enamida
FT452	-1,0493	(Z)-Docos-13-enamida
FT320	-1,0724	(Z)-Docos-13-enamida
FT095	-1,1012	Éter eicosil-isobutilico
FT435	-1,1050	(Z)-Docos-13-enamida
FT324	-1,1126	(Z)-Docos-13-enamida
FT394	-1,1904	Éter docosil-pentílico
FT450	-1,2067	(Z)-Docos-13-enamida
FT319	-1,2560	(Z)-Docos-13-enamida
FT088	-1,3143	3,5-Di-terc-butil-4-hidroxi-benzaldéido
FT111	-1,3183	Fucosa
FT427	-1,4359	(Z)-Docos-13-enamida
FT421	-1,4607	(Z)-Docos-13-enamida
FT422	-1,5175	(Z)-Docos-13-enamida
FT429	-1,5291	(Z)-Docos-13-enamida
FT424	-1,5395	(Z)-Docos-13-enamida
FT557	-1,5612	Dodecametilciclohexasiloxano
FT431	-1,6244	(Z)-Docos-13-enamida
FT430	-1,6269	(Z)-Docos-13-enamida
FT432	-1,6346	(Z)-Docos-13-enamida
FT548	-1,6823	Dodecametilciclohexasiloxano
FT153	-1,8610	(Z)-Docos-13-enamida
FT423	-1,9806	Éter isopropil-tetradecílico
FT428	-2,1531	(Z)-Docos-13-enamida
FT502	-2,1852	(Z)-Docos-13-enamida
FT169	-2,2370	2-Fenilciclohexanol
FT454	-2,3177	(Z)-Docos-13-enamida

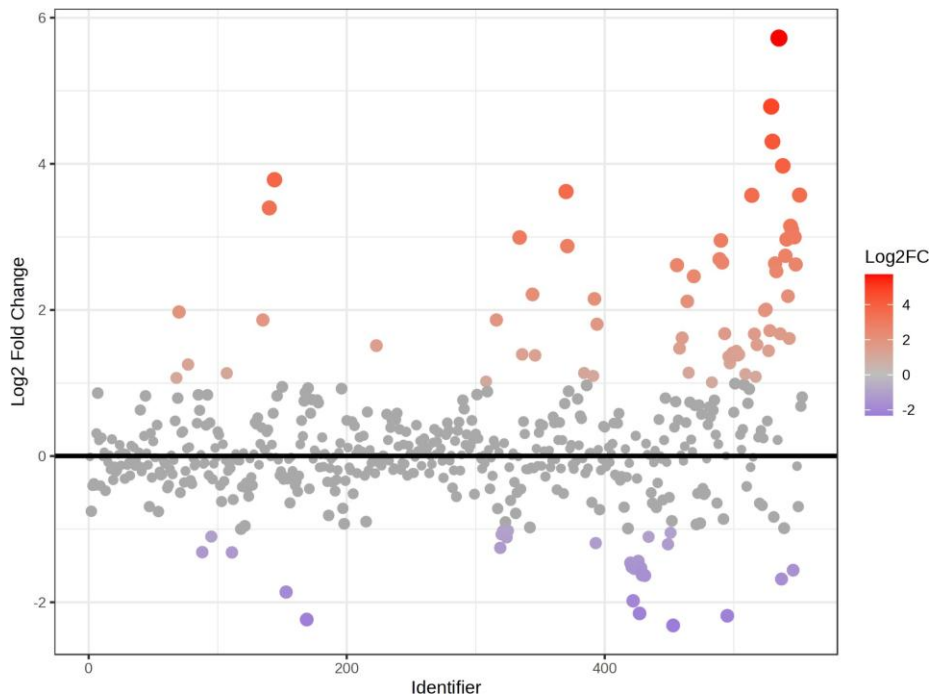


Gráfico 11. *Fold Change* dos tratamentos sem tomate e com biomaterial na coleta 60 DAP.

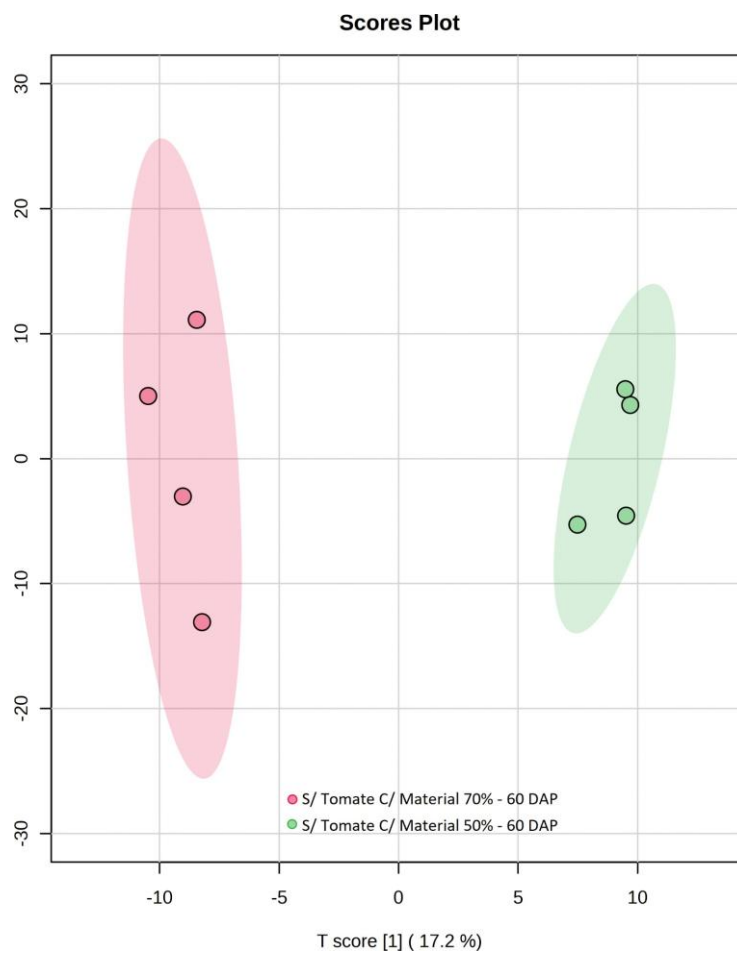


Gráfico 12. *Scores plot* da análise orthoPLS-DA dos tratamentos sem tomate e com biomaterial na coleta 60 DAP.

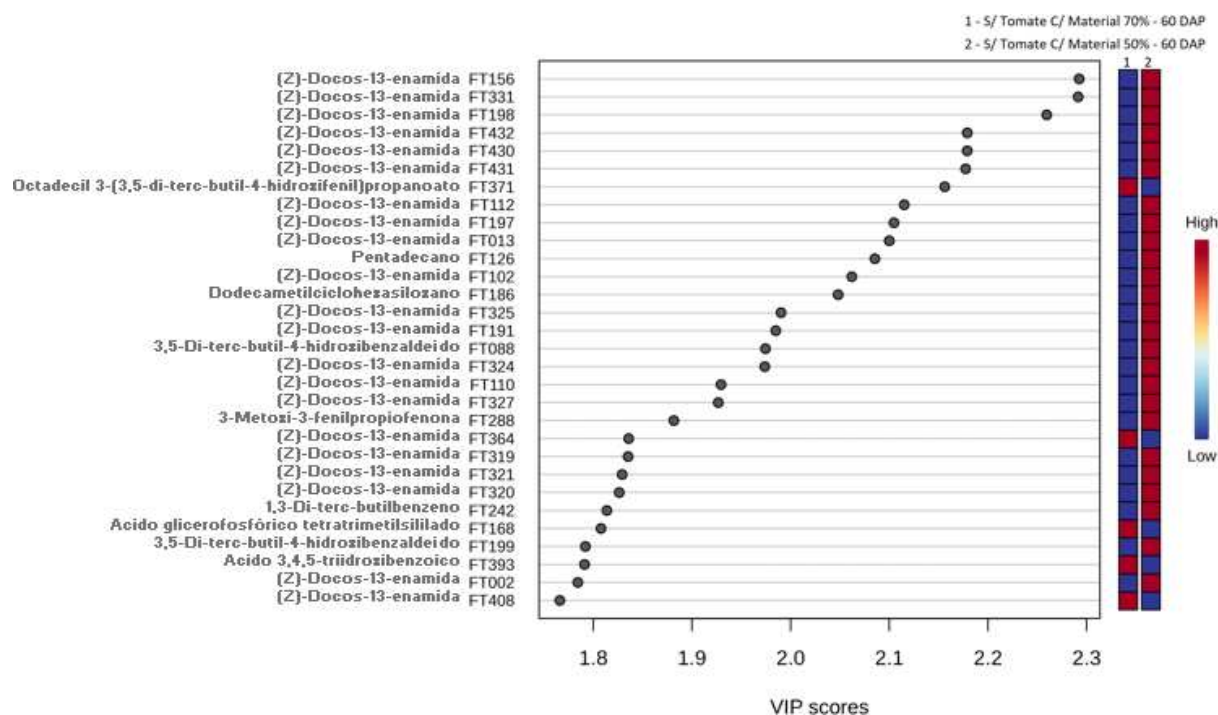


Gráfico 13. VIP score da análise orthoPLS-DA dos tratamentos sem tomate e com biomaterial na coleta 60 DAP.

A Tabela 12 e o Gráfico 14 mostram a análise de FC (Fold Change) feita pelo contraste entre os tratamentos sem tomate e sem biomaterial a 70% e a 50% C.C. na coleta de 60 DAP. Observa-se que existem 28 sinais com maior presença a 70% e 47 sinais com maior presença a 50%. Também foi realizada análise de orthoPLS-DA, com os mesmos tratamentos, onde o Gráfico 15 apresenta a diferença entre os grupos, mais uma vez evidenciando o efeito do tratamento hídrico mesmo após a restauração da umidade. O Gráfico 16 traz os 30 sinais mais importantes para a diferenciação entre esses tratamentos.

Sinal	log2 FC	Identificação
FT525	3,0747	Dodecametilciclohexasiloxano
FT066	2,7643	(Z)-Docos-13-enamida
FT395	2,3145	Éter isopropil-tetradecílico
FT392	2,2132	Ácido octadecanoico
FT322	2,2000	(Z)-Docos-13-enamida
FT396	1,8963	Dodecametilciclohexasiloxano
FT074	1,8575	Ácido octadec-9-enoico

Sinal	log2 FC	Identificação
FT463	-1,0530	(Z)-Docos-13-enamida
FT527	-1,0543	Dodecametilciclohexasiloxano
FT223	-1,0563	Dodecametilciclohexasiloxano
FT528	-1,0626	Dodecametilciclohexasiloxano
FT501	-1,0683	(Z)-Docos-13-enamida
FT079	-1,1126	Dodecametilciclohexasiloxano
FT531	-1,1275	Dodecametilciclohexasiloxano

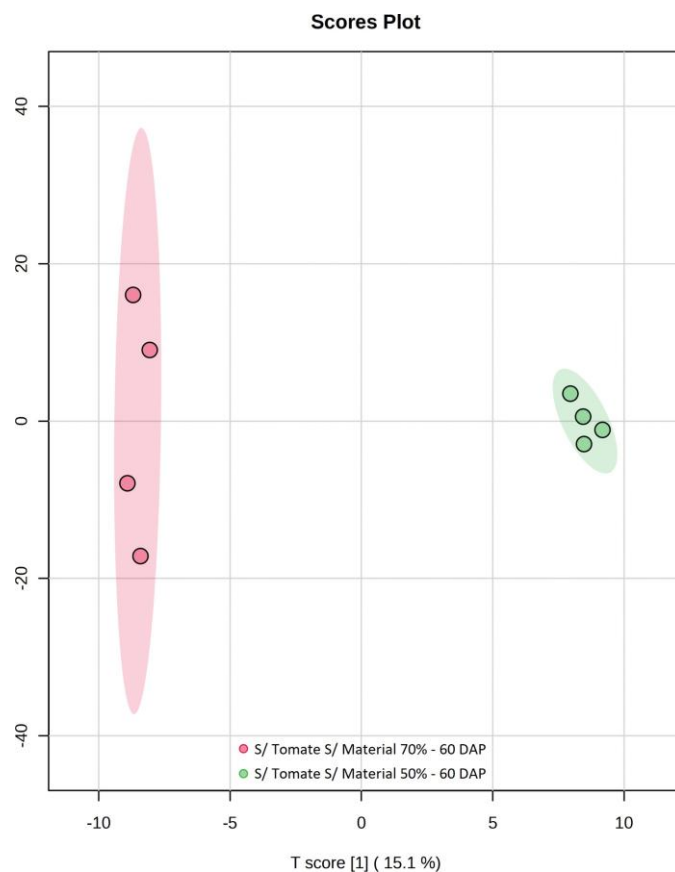


Gráfico 15. Scores plot da análise orthoPLS-DA dos tratamentos sem tomate e sem biomaterial na coleta 60 DAP.

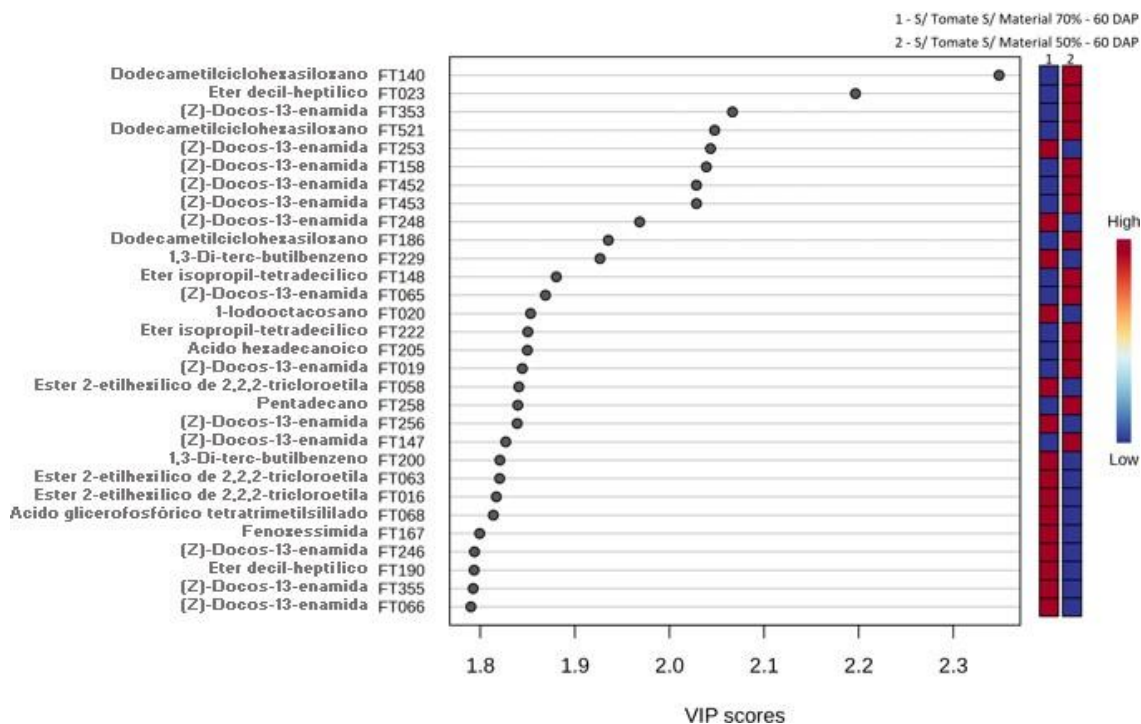


Gráfico 16. VIP score da análise orthoPLS-DA dos tratamentos sem tomate e sem biomaterial na coleta 60 DAP.

A condição de tratamento com o biomaterial a 70% apresenta um maior número de metabólitos significativamente alterados (63), quando comparado com o tratamento sem o biomaterial (28), o que sugere um efeito da presença do biomaterial com maior período de experimento (60 DAP) na condição sem o estresse hídrico. Já a 50%, o número de metabólitos significativos é menor com a aplicação do biomaterial (28) e maior sem a aplicação (47), logo é possível observar o efeito de redução do impacto do déficit hídrico, mesmo após a restauração da umidade. O acúmulo de metabólitos nas células pode ocorrer sob condições de estresse, reforçando a ideia de que a resposta metabólica e a recuperação são complexas, mas que pode ser modulada por intervenções externas como a aplicação de fertilizantes orgânicos (Withers *et al.*, 2020; Vinci *et al.*, 2018).

Pelas Tabelas 11 e 12 é possível observar a repetição de metabólitos, mais uma vez evidenciando o poder do biomaterial de modular o comportamento metabólico, invertendo inclusive o padrão de alguns.

4.6.3. Tratamentos Com Tomate da Coleta 45 DAP

O Gráfico 17 apresenta um *scores plot* da análise multivariada supervisionada sPLS-DA, mostrando a separação entre os grupos de tratamento. O grupo 'Branco' está mais afastado evidenciando sua total diferença em relação às amostras. Já o restante dos tratamentos apresentam uma proximidade entre si.



Figura 8. Foto das plantas de tomates de cada tratamento, na coleta de 45 DAP.

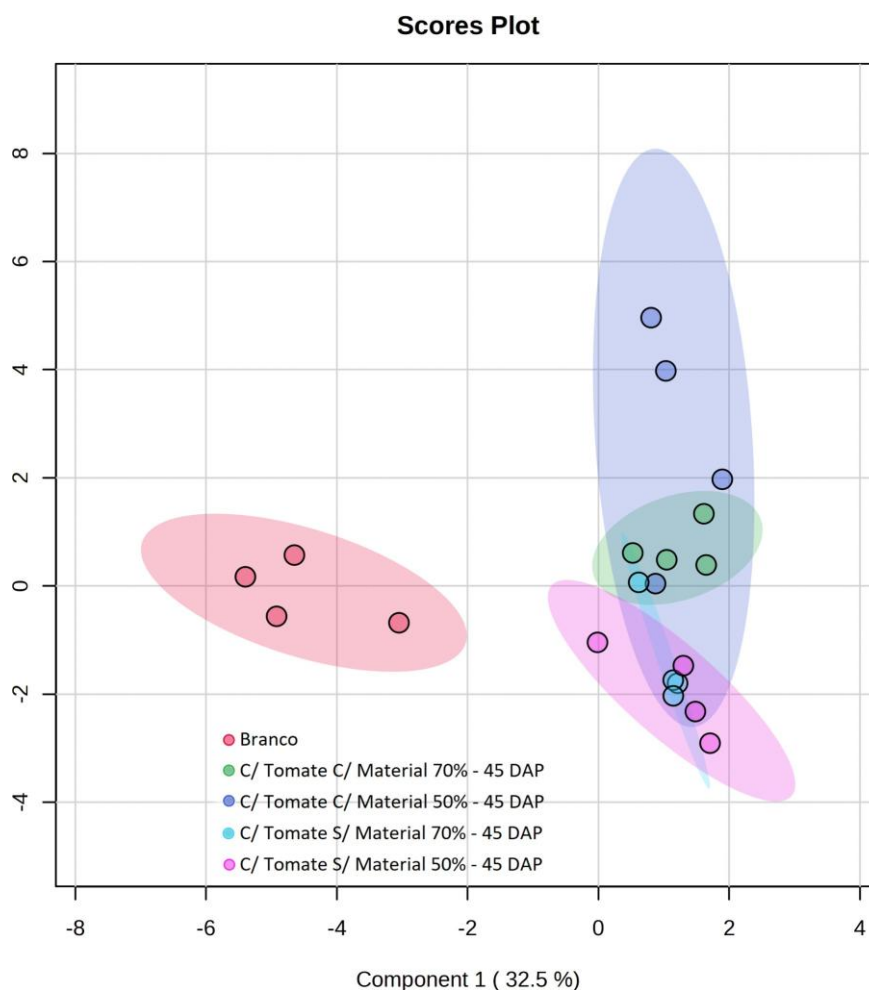


Gráfico 17. Scores plot da análise sPLS-DA dos tratamentos com tomate na coleta 45 DAP.

A Tabela 13 e o Gráfico 18 mostram a análise de FC (Fold Change) feita pelo contraste entre os tratamentos com tomate e com biomaterial a 70% e a 50% C.C. na coleta de 45 DAP. É possível observar que existem 36 sinais com maior presença nos tratamentos a 70% C.C. e, conseqüentemente, com menor presença a 50%, assim como existem 14 sinais com maior presença nos tratamentos a 50% C.C. e, portanto, menos a 70%. Também foi realizada análise de orthoPLS-DA, com os mesmos tratamentos, onde o Gráfico 19 evidencia a diferença entre os grupos comprovando a influência do déficit hídrico no funcionamento do solo. O Gráfico 20 traz os 30 sinais mais importantes para a diferenciação.

Sinal	log2 FC	Identificação
FT562	5,7741	Dodecametilciclohexasiloxano
FT386	3,0964	Éter isopropil-tetradecílico

Sinal	log2 FC	Identificação
FT095	-1,0495	Éter eicosil-isobutilico
FT383	-1,0591	Ácido octadecanoico

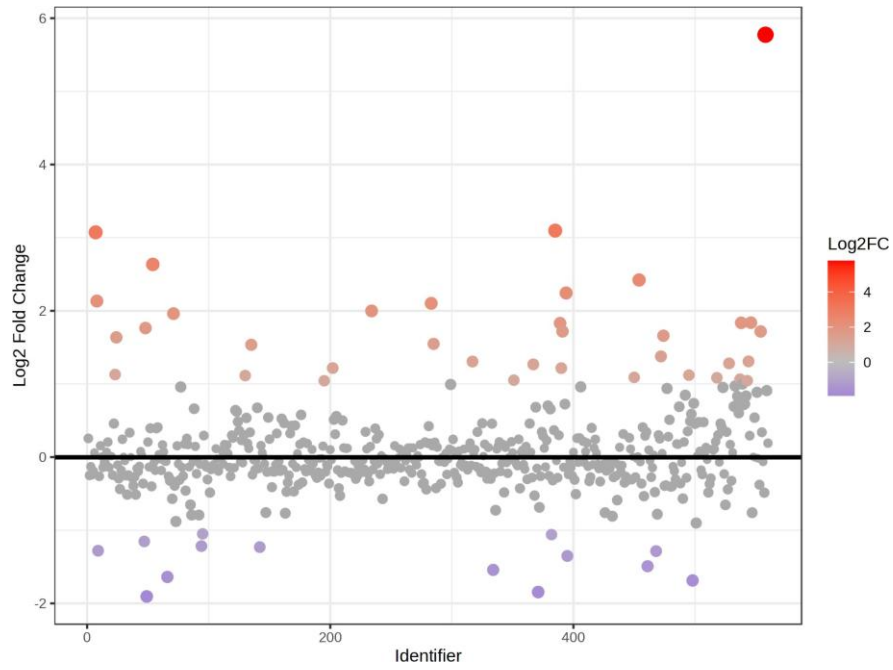


Gráfico 18. *Fold Change* dos tratamentos com tomate e com biomaterial na coleta 45 DAP.

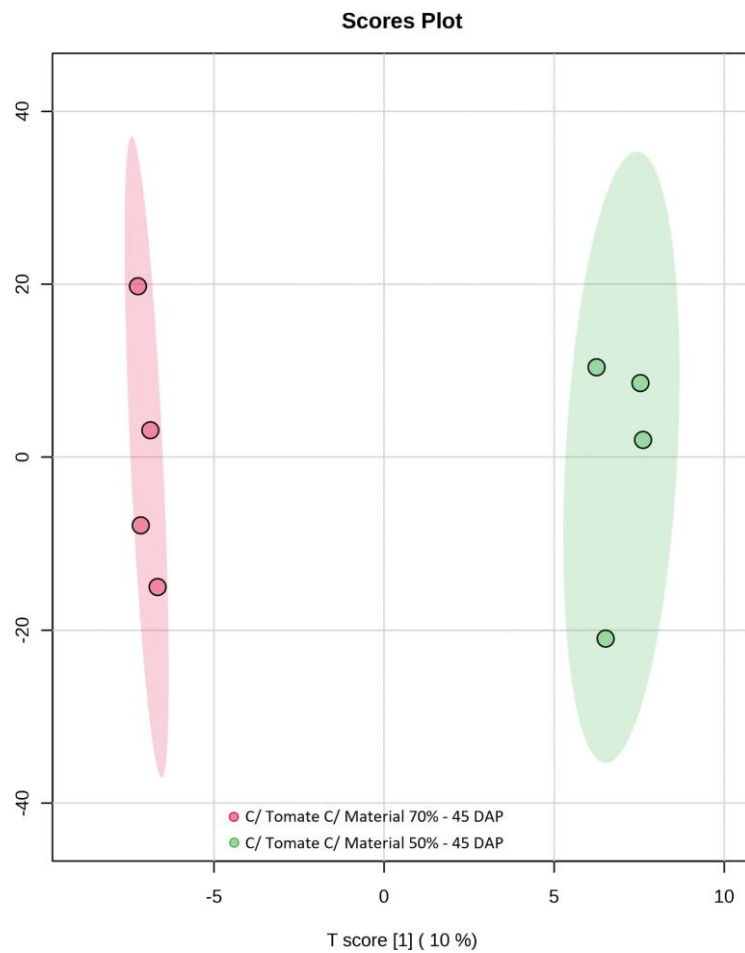


Gráfico 19. *Scores plot* da análise orthoPLS-DA dos tratamentos com tomate e com biomaterial na coleta 45 DAP.

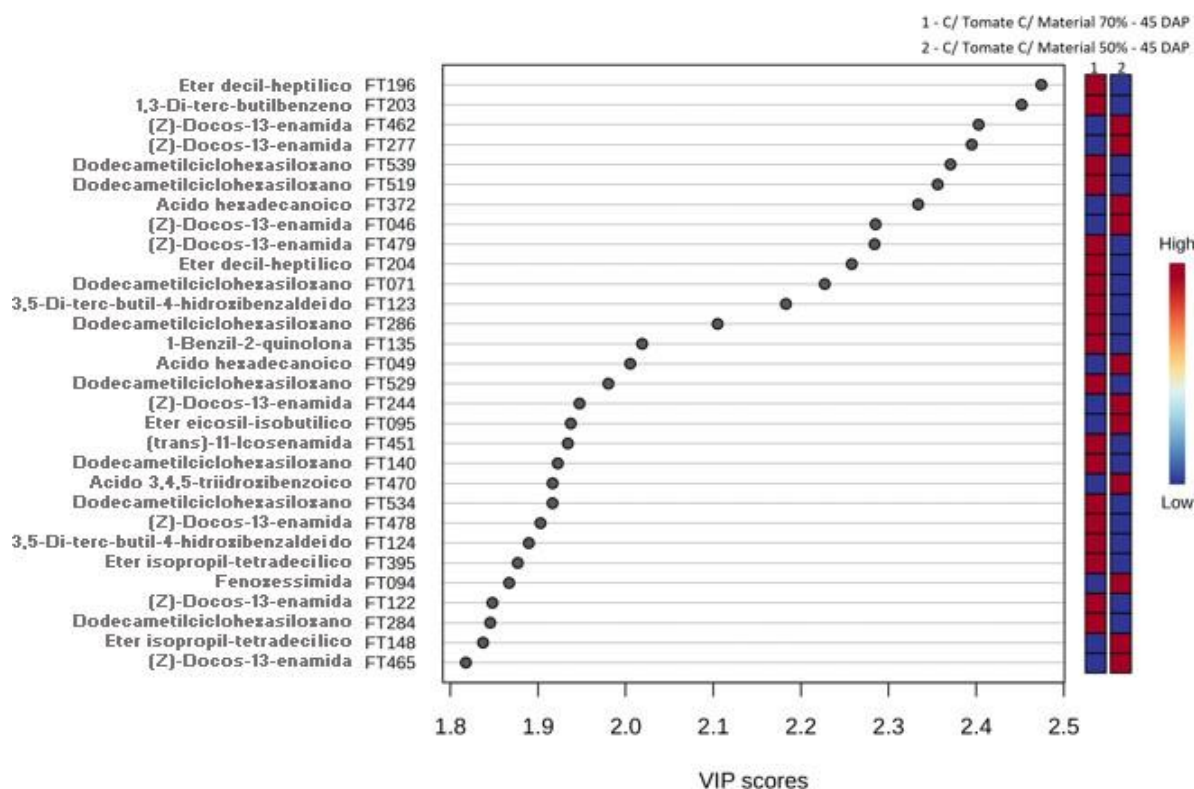


Gráfico 20. VIP score da análise orthoPLS-DA dos tratamentos com tomate e com biomaterial na coleta 45 DAP.

A Tabela 14 e o Gráfico 21 mostram a análise de FC (Fold Change) feita pelo contraste entre os tratamentos com tomate e sem biomaterial a 70% e a 50% C.C. na coleta de 45 DAP. Observa-se que existem 12 sinais com maior presença a 70% e 19 sinais com maior presença a 50%. Também foi realizada análise de orthoPLS-DA, com os mesmos tratamentos, onde o Gráfico 22 apresenta a diferença entre os grupos, mais uma vez evidenciando o efeito do tratamento hídrico. O Gráfico 23 traz os 30 sinais mais importantes para a diferenciação entre esses tratamentos.

Sinal	log2 FC	Identificação
FT564	1,8563	Dodecametilciclohexasiloxano
FT107	1,8084	Éter decil-heptílico
FT308	1,4377	Dodecametilciclohexasiloxano
FT300	1,3355	1,3-Di-terc-butilbenzeno
FT044	1,3101	3,5-Di-terc-butil-4-hidroxibenzaldeído

Sinal	log2 FC	Identificação
FT548	-1,0034	Dodecametilciclohexasiloxano
FT391	-1,0583	Ácido octadecanoico
FT395	-1,1161	Éter isopropil-tetradecílico
FT367	-1,2541	Ácido 3,4-diidroximandélico
FT050	-1,2956	(Z)-Docos-13-enamida

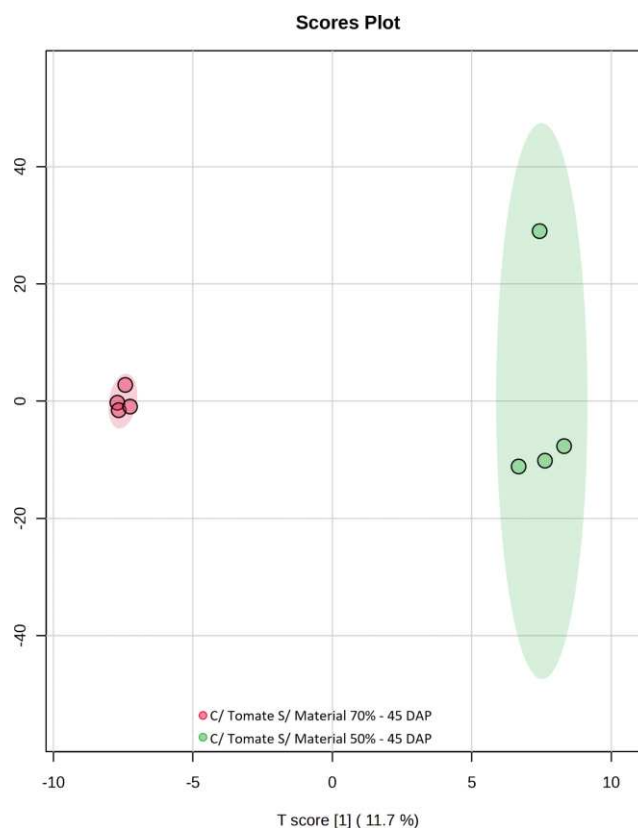


Gráfico 22. Scores plot da análise orthoPLS-DA dos tratamentos com tomate e sem biomaterial na coleta 45 DAP.

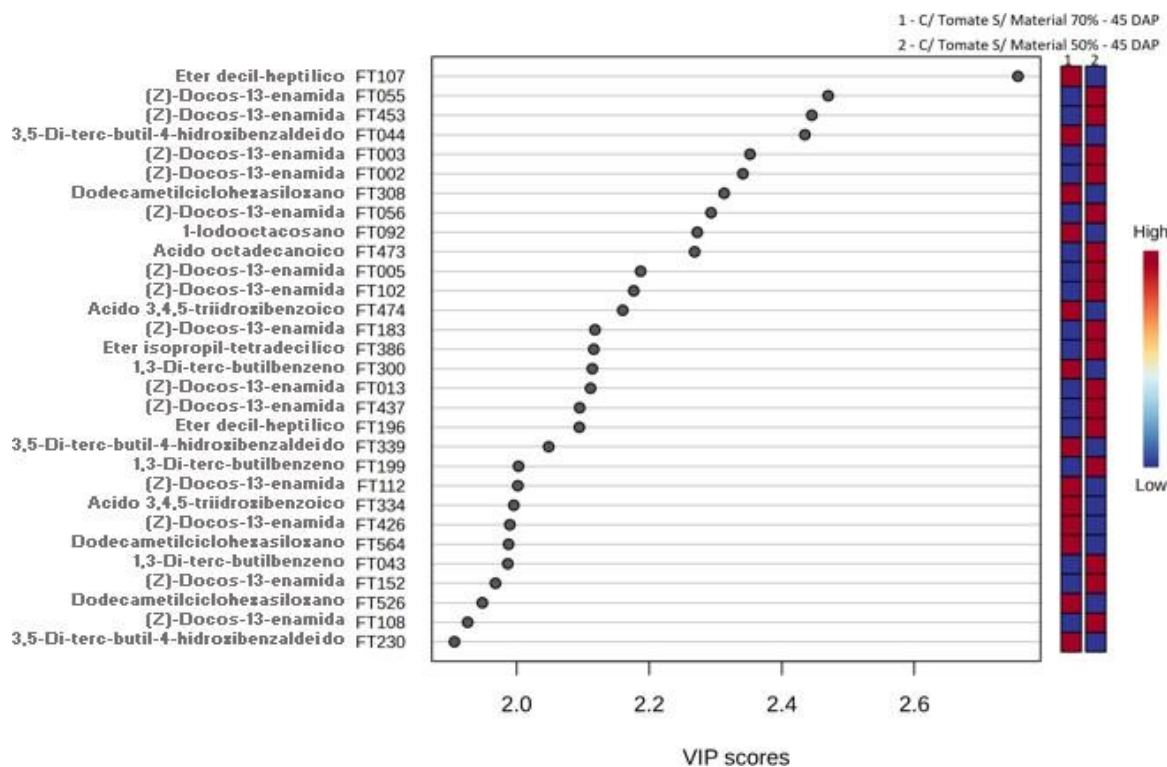


Gráfico 23. VIP score da análise orthoPLS-DA dos tratamentos com tomate e sem biomaterial na coleta 45 DAP.

A condição de tratamento com o biomaterial apresenta um maior número total de metabólitos significativamente alterados, quando comparado com a ausência deste (50 x 31) (Gráficos 18 e 21), o que sugere um efeito do biomaterial na modulação do funcionamento do solo. Em contraste, a ausência do biomaterial mantém o perfil do solo mais estável, com poucas alterações (12 x 19). Em estudo realizado por Sharma *et al.* (2024) foram identificados 23 metabólitos que sofreram alteração em condições de estresse hídrico quando comparados com as plantas-controle, destacando a complexidade das adaptações bioquímicas envolvidas na tolerância ao estresse.

4.6.4. Tratamentos Com Tomate da Coleta 60 DAP

O Gráfico 24 apresenta um *scores plot* da análise multivariada supervisionada sPLS-DA, mostrando a separação entre os grupos de tratamento. O grupo 'Branco' está mais afastado evidenciando sua total diferença em relação às amostras. É possível observar uma proximidade entre os tratamentos.



Figura 9. Foto das plantas de tomates de cada tratamento, na coleta de 60 DAP

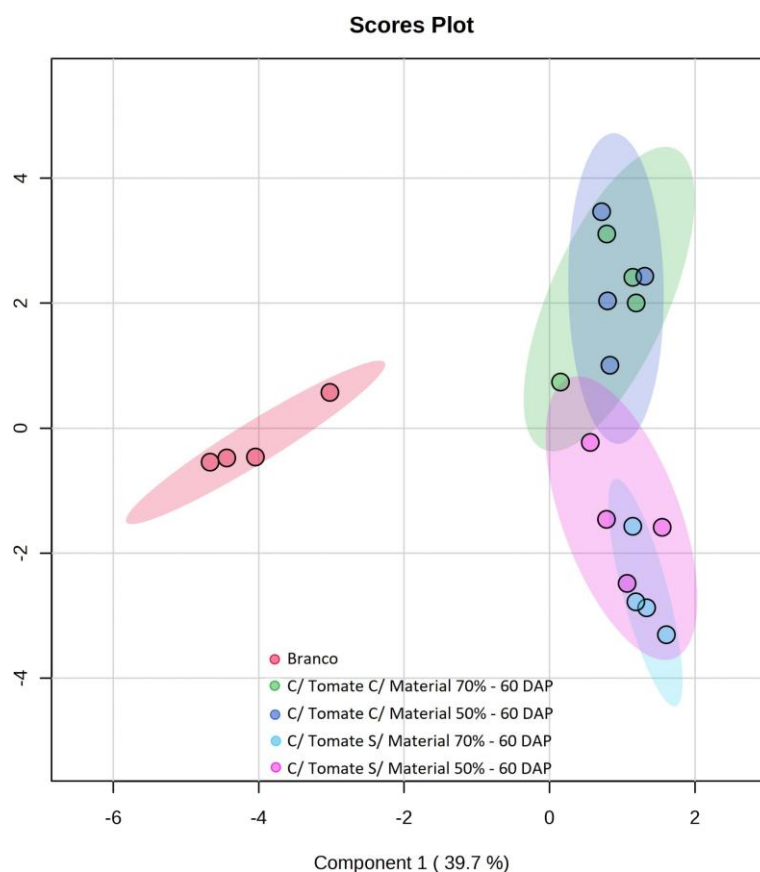


Gráfico 24. Scores plot da análise sPLS-DA dos tratamentos com tomate na coleta 60 DAP.

A Tabela 15 e o Gráfico 25 mostram a análise de FC (Fold Change) feita pelo contraste entre os tratamentos com tomate e com biomaterial a 70% e a 50% C.C. na coleta de 60 DAP. É possível observar que existem 14 sinais com maior presença nos tratamentos a 70% C.C. e, conseqüentemente, com menor presença a 50%, assim como existem 31 sinais com maior presença nos tratamentos a 50% C.C. e, portanto, menos a 70%. Também foi realizada análise de orthoPLS-DA, com os mesmos tratamentos, onde o Gráfico 26 evidencia a diferença entre os grupos comprovando a influência do déficit hídrico no funcionamento do solo mesmo após a restauração da umidade, e o Gráfico 27 traz os 30 sinais mais importantes para a diferenciação.

Sinal	log2 FC	Identificação
FT502	2,7109	(Z)-Docos-13-enamida
FT082	1,8687	(Z)-Docos-13-enamida
FT007	1,8601	Éter decil-heptílico

Sinal	log2 FC	Identificação
FT373	-1,0353	Ácido glicerofosfórico tetratrimetilsililado
FT473	-1,0514	Ácido octadecanoico
FT468	-1,0808	Éter docosil-pentílico

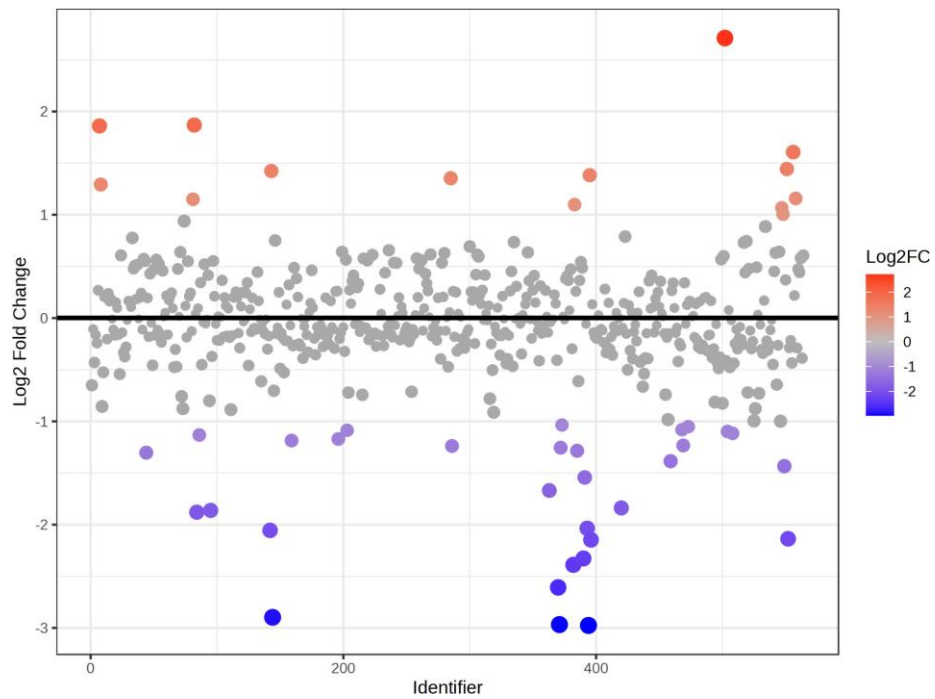


Gráfico 25. *Fold Change* dos tratamentos com tomate e com biomaterial na coleta 60 DAP.

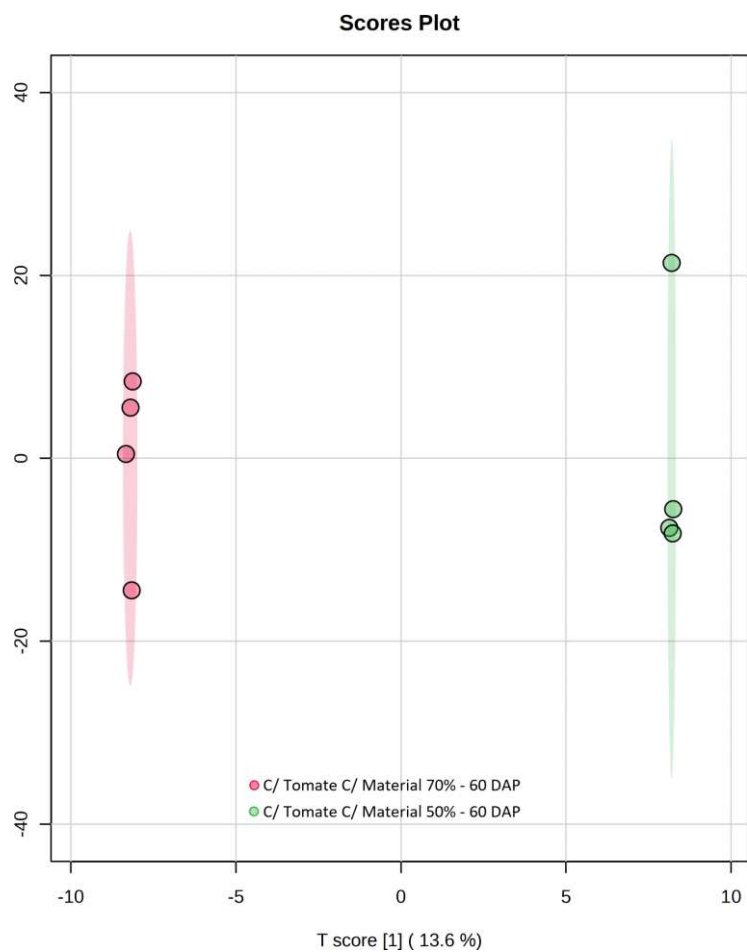


Gráfico 26. *Scores plot* da análise orthoPLS-DA dos tratamentos com tomate e com biomaterial na coleta 60 DAP.

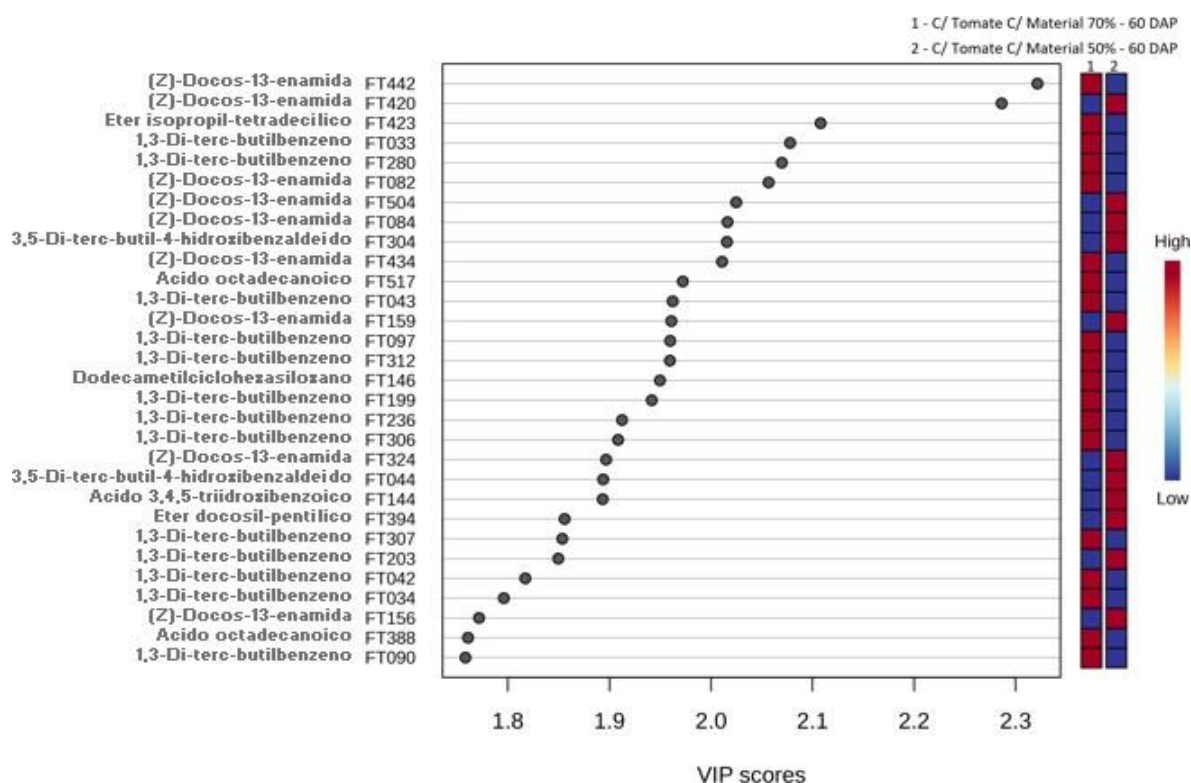


Gráfico 27. VIP score da análise orthoPLS-DA dos tratamentos com tomate e com biomaterial na coleta 60 DAP.

A Tabela 16 e o Gráfico 28 mostram a análise de FC (Fold Change) feita pelo contraste entre os tratamentos com tomate e sem biomaterial a 70% e a 50% C.C. na coleta de 60 DAP. Observa-se que existem 21 sinais com maior presença a 70% e 28 sinais com maior presença a 50%. Também foi realizada análise de orthoPLS-DA, com os mesmos tratamentos, onde o Gráfico 29 apresenta a diferença entre os grupos, mais uma vez evidenciando o efeito do tratamento hídrico mesmo após a restauração da umidade, e o Gráfico 30 traz os 30 sinais mais importantes para a diferenciação entre esses tratamentos.

Sinal	log2 FC	Identificação
FT542	1,5577	Dodecametilciclohexasiloxano
FT284	1,5438	Dodecametilciclohexasiloxano
FT166	1,4744	Éter decil-heptílico
FT143	1,4551	Ácido 3,4,5-triidroxibenzoico
FT557	1,2889	Dodecametilciclohexasiloxano

Sinal	log2 FC	Identificação
FT177	-1,0016	3-Bromobiciclo(3,2,2)nonan-2-ona
FT546	-1,0078	Dodecametilciclohexasiloxano
FT426	-1,0143	(Z)-Docos-13-enamida
FT052	-1,0202	Éter docosil-pentílico
FT144	-1,0494	Ácido 3,4,5-triidroxibenzoico

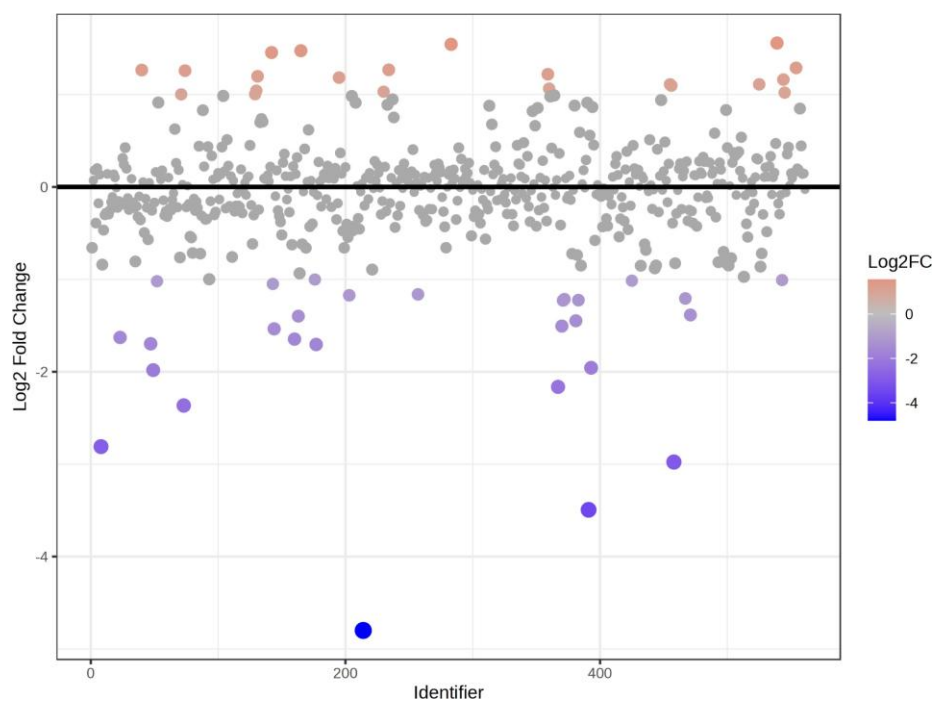


Gráfico 28. *Fold Change* dos tratamentos com tomate e sem biomaterial na coleta 60 DAP.

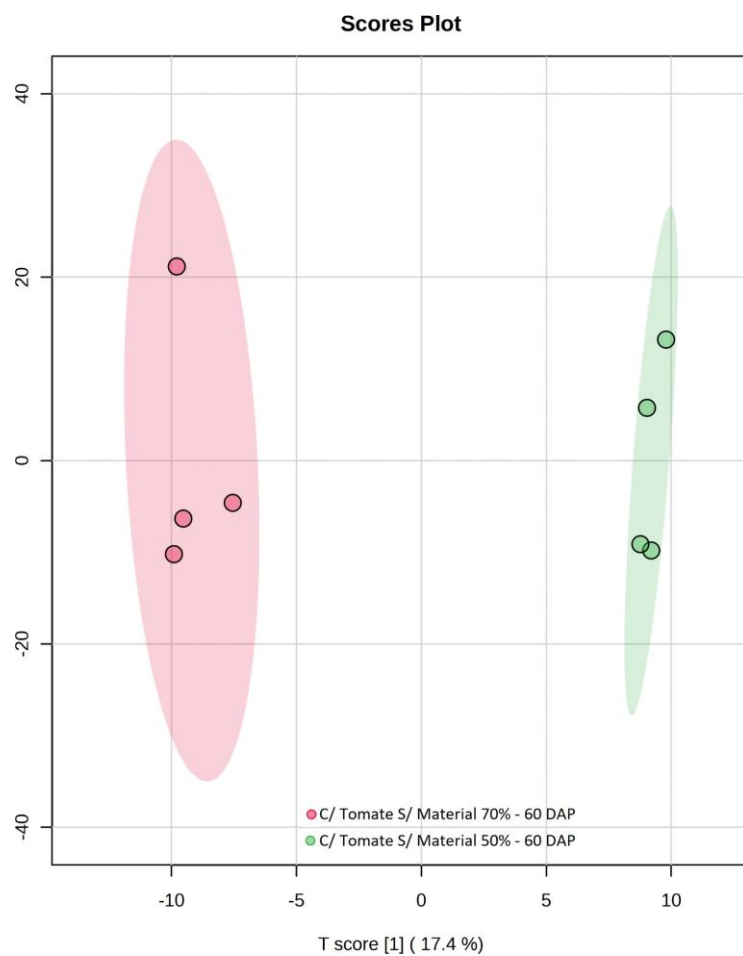


Gráfico 29. *Scores plot* da análise orthoPLS-DA dos tratamentos com tomate e sem biomaterial na coleta 60 DAP.

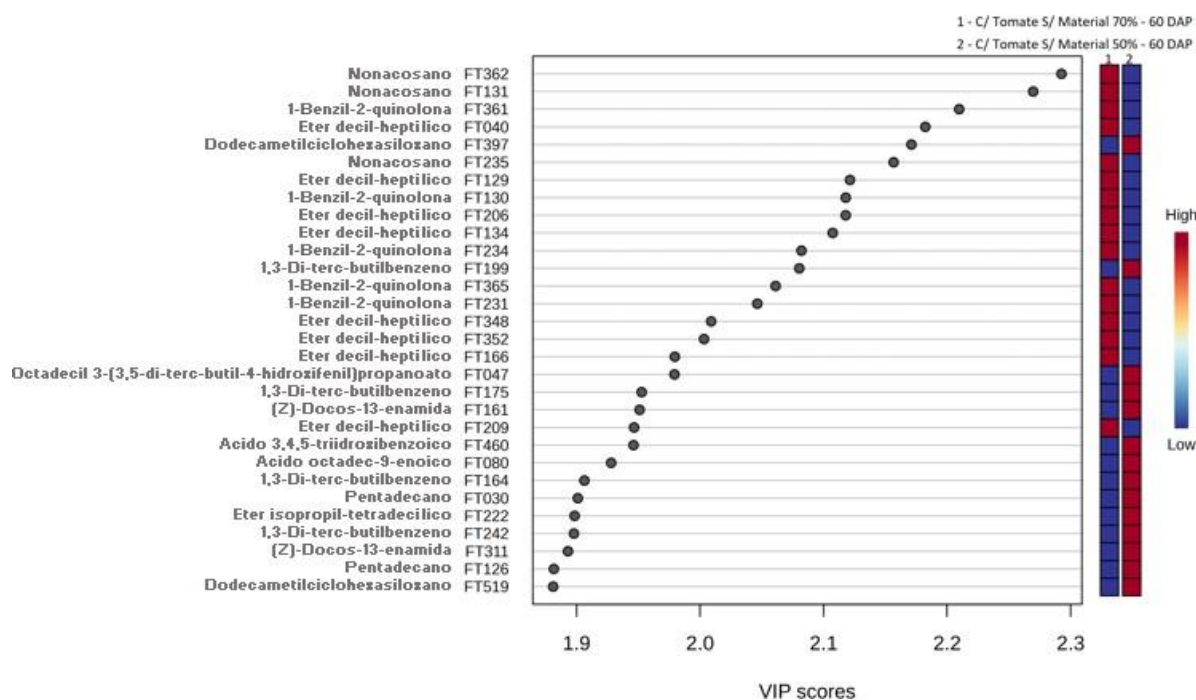


Gráfico 30. VIP score da análise orthoPLS-DA dos tratamentos com tomate e sem biomaterial na coleta 60 DAP.

A condição de tratamento com o biomaterial apresenta um maior número de metabólitos significativamente alterados a 50%, quando comparado com o tratamento a 70% (14 x 31), o que sugere um efeito da presença do biomaterial na mitigação do déficit hídrico com maior período de experimento. Em Sicher *et al.* (2012), foi observado que alguns metabólitos se recuperaram rapidamente com o fim do estresse hídrico, enquanto outros voltaram aos níveis normais após vários dias, e alguns foram corrigidos em excesso. Isso indica que diferentes metabólitos respondem e se ajustam de maneiras distintas, refletindo a complexidade da adaptação das plantas após a exposição ao estresse. Pelas Tabelas 15 e 16 é possível observar a repetição de metabólitos nas duas condições, mais uma vez evidenciando o poder do biomaterial de modular o comportamento metabólico do solo.

5. CONCLUSÃO

O experimento apresentou resultados pouco claros quanto às análises bioquímicas do solo, possivelmente pela sua curta duração, também pelo tamanho do vaso e características do substrato. O que foi mais evidente foi o efeito da planta no sistema, que atuou como fonte de nutrientes para a microbiota pela produção de exsudatos radiculares. Quanto aos resultados biométricos, ficou evidente que a presença do biomaterial teve efeito positivo no desenvolvimento, enquanto o déficit hídrico teve apenas efeito visual na planta.

A análise metabolômica permitiu agrupar os diferentes tratamentos com base nos perfis de compostos encontrados nos substratos, considerando a presença ou ausência de biomaterial no solo, os diferentes níveis de disponibilidade hídrica e a influência das plantas de tomate. Entre os compostos detectados, foi possível identificar aqueles com potencial relevância para os efeitos observados no funcionamento dos microrganismos/metabolismo microbiano do solo e no desenvolvimento das plantas. Estudos futuros focados na caracterização desses compostos e sua atuação no ambiente do solo poderão esclarecer o papel dos biomateriais como bioinsumos, contribuindo tanto para a proteção das plantas contra o estresse hídrico quanto para a promoção do seu crescimento.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbass, Kashif *et al.* A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. **Environmental Science And Pollution Research**, [S.L.], v. 29, n. 28, p. 42539-42559, 4 abr. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>.

Abbas, Aown *et al.* Lignin-based controlled release fertilizers: a review. **International Journal Of Biological Macromolecules**, [S.L.], v. 222, p. 1801-1817, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.265>.

Almeida, Cássio de Souza; Nascimento, Daniela Defávári do. Revisão: Leveduras Utilizadas Na Produção De Etanol De Segunda Geração. **Bioenergia em Revistas: Diálogos**, Piracicaba, v. 11, n. 1, p. 99-119, jan./jun. 2021.

Alves, Elvis da S. *et al.* Water deficit on the growth and yield of irrigated soybean in the Brazilian Cerrado region. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 11, p. 750-757, 2021.

Amorin, M. C. C. Caracterização e avaliação paramétrica da manipueira. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, XXI, Fortaleza, 2016.

An, Xiongfang *et al.* Incorporation of biochar into semi-interpenetrating polymer networks through graft co-polymerization for the synthesis of new slow-release fertilizers. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 272, p. 122731, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122731>.

Anderson, T; Domsch, K. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology And Biochemistry**, [S.L.], v. 25, n. 3, p. 393-395, mar. 1993. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90140-7](http://dx.doi.org/10.1016/0038-0717(93)90140-7).

Antisari, Livia Vittori *et al.* Soil Biochemical Indicators and Biological Fertility in Agricultural Soils: a case study from northern Italy. **Minerals**, [S.L.], v. 11, n. 2, p. 219, 20 fev. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/min11020219>.

Araujo Filho, José Coelho de *et al.* Solos do Semiárido: características e estoque de carbono. In: BRASIL. Vanderlise Giongo e Francislene Angelotti. Embrapa Semiárido (ed.). **Agricultura de baixa emissão de carbono em regiões semiáridas: experiência brasileira**. Brasília: Embrapa, 2022. Cap. 6. p. 93-112.

Ataides, Geilton Costa *et al.* Variação Espacial Dos Atributos Físicos E Estoques De Carbono Do Solo Em Plantio De *Schizolobium amazonicum* Na Amazônia. **Nativa**, [S.L.], v. 10, n. 4, p. 566-576, 14 nov. 2022. Nativa. <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v10i4.14540>.

Bai, Wenbo *et al.* Preparation and Characterization of a Novel Cassava Starch-Based Phosphorus Releasing Super-Absorbent Polymer, and Optimization of the Performance of Water Absorption and Phosphorus Release. **Polymers**, [S.L.], v. 15, n. 5, p. 1233, 28 fev. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym15051233>.

Barros, Henrique S.; Fearnside, Philip M.. Soil carbon stock changes due to edge effects in central Amazon forest fragments. **Forest Ecology And Management**, [S.L.], v. 379, p. 30-36, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.08.002>.

Barros, P. D. S. *et al.* Subproduto Agroindustrial Milhocina Usado como uma Fonte de Indução da Produção de Proteases por *Arthrospira platensis*. In: **Seminário Brasileiro de Tecnologia Enzimática**, XII, Caxias do Sul, 2016.

Barros, Hellycson Dias. **Mineralização do carbono de resíduos culturais de soja e milho em Cambissolo e Neossolo**. 2022. 41 f. TCC (Graduação) - Curso de Agronomia, Universidade Federal de Santa Catarina, Curitibanos, 2022.

Bartlett, Richmond J.; Ross, Donald S. Colorimetric Determination of Oxidizable Carbon in Acid Soil Solutions. **Soil Science Society Of America Journal**, [S.L.], v. 52, n. 4, p. 1191-1192, jul. 1988. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200040055x>.

Bashan, Y., Hernandez, J. P., Leyva, L. A., and Bacilio, M. Alginate microbeads as inoculant carriers for plant growth-promoting bacteria. **Biology and Fertility of Soils**, [S.L.], v. 35, p. 359–368. 2002. doi: 10.1007/s00374-002-0481-485

Batjes, N. H. Organic carbon stocks in the soils of Brazil. **Soil Use And Management**, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 22-24, 1 mar. 2005. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1079/sum2005286>.

Beale, D.J. *et al.* A multi-omics based ecological analysis of coastal marine sediments from Gladstone, in Australia's Central Queensland, and Heron Island, a nearby fringing platform reef. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 609, p. 842-853, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.184>.

Beale, D.J. *et al.* Seasonal metabolic analysis of marine sediments collected from Moreton Bay in South East Queensland, Australia, using a multi-omics-based approach. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 631-632, p. 1328-1341, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.106>.

Bento, Bruno de Campos. **Análise estatística de dados de metabolômica: identificação dos compostos envolvidos na resposta das plantas à simbiose com fungos ectomicorrízicos**. 2020. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Bioestatística, Departamento de Estatística e Investigação Operacional, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2020.

Bernardo, Astrogildo Pires *et al.* Oportunidades e desafios do uso de biomassa compactada para fins energéticos. In: Pacheco, Clecia Simone Gonçalves Rosa *et al* (org.). **Biomassa: recursos, aplicações e tecnologias em pesquisas**. Guarujá: Editora Científica Digital, 2022. p. 97-113.

Bessa, Daniela de Moraes. **Ciclo do carbono na floresta amazônica: Percepções Ambientais de Moradores da Reserva Extrativista do Baixo Juruá, Amazônia Ocidental, Brasil**. 2019. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

Blanco-Canqui, Humberto; Lal, R. Crop Residue Removal Impacts on Soil Productivity and Environmental Quality. **Critical Reviews In Plant Sciences**, [S.L.], v. 28, n. 3, p. 139-163, 3 abr. 2009. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/07352680902776507>.

Bolan, Shiv *et al.* The potential of biochar as a microbial carrier for agricultural and environmental applications. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 886, p. 163968, ago. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163968>.

Bomfim, Jôse Raymara Alves Lima. **Síntese de fertilizantes de liberação lenta usando os resíduos da carcinicultura como fonte de nutrientes**. 2024. 91 f. Tese (Doutorado em Química e Biotecnologia) – Programa de Pós-Graduação em Química e Biotecnologia, Instituto de Química e Biotecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2024.

Borelli, Laíze Matos. **Fertilizantes De Eficiência Aprimorada - Perspectivas E Potencial De Uso De Biopolímeros Como Matrizes De Liberação Lenta Ou Controlada**. 2020. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Agrônômica, Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2020.

Bossio, D. A. *et al.* The role of soil carbon in natural climate solutions. **Nature Sustainability**, [S.L.], v. 3, n. 5, p. 391-398, 16 mar. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41893-020-0491-z>.

Bustamante, M. M. C.; Nardoto, G. B. E Pinto, A. S. Mudanças climáticas e ecossistemas. In: **Scientific American Brasil**, Edição Especial v. 39, 78 – 82, 2010. [https://aprender.ead.unb.br/pluginfile.php/26179/mod_resource/content/1/Bustamant e_et_al_2012_Mudanca_climatica_e_ecossistemas.pdf](https://aprender.ead.unb.br/pluginfile.php/26179/mod_resource/content/1/Bustamant_e_et_al_2012_Mudanca_climatica_e_ecossistemas.pdf)

Canuto, G. A. B. *et al.* METABOLÔMICA: definições, estado-da-arte e aplicações representativas. **Química Nova**, Vol. 41, n. 1, p.75-91, 2018. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170134>.

Canteri, M. G., Althaus, R. A., Virgens Filho, J. S., Giglioti, E. A., Godoy, C. V. SASM - Agri : Sistema para análise e separação de médias em experimentos agrícolas pelos métodos Scoft - Knott, Tukey e Duncan. **Revista Brasileira de Agrocomputação**, V.1, N.2, p.18-24. 2001.

Carneiro, Jade Müller *et al.* Carbon and water footprints of Brazilian mango produced in the semiarid region. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, [S.L.], v. 24, n. 4, p. 735-752, 11 set. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-018-1527-8>.

Chagas, Bruna S. *et al.* Produção de celulose bacteriana a partir de melaço de soja hidrolisado. In: IX WORKSHOP DE NANOTECNOLOGIA APLICADA AO AGRONEGÓCIO, 2017, São Carlos. **Anais [...]**. São Carlos: Embrapa, 2017. p. 303-306.

Chowdhury, Mohammad A.. The controlled release of bioactive compounds from lignin and lignin-based biopolymer matrices. **International Journal Of Biological Macromolecules**, [S.L.], v. 65, p. 136-147, abr. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.01.012>.

Chen, Songling *et al.* Preparation and characterization of slow-release fertilizer encapsulated by biochar-based waterborne copolymers. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 615, p. 431-437, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.209>.

Ciais; P. *et al.* Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: STOCKER, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex; P.M. Midgley (Eds.). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

Coppens, F.; Merckx, R.; Recous, S.. Impact of crop residue location on carbon and nitrogen distribution in soil and in water-stable aggregates. **European Journal Of Soil Science**, [S.L.], v. 57, n. 4, p. 570-582, 26 maio 2006. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00825.x>.

Cordeiro, Noéle Khristinne *et al.* Gestão De Resíduos Agrícolas Como Forma De Redução Dos Impactos Ambientais. **Revista de Ciências Ambientais**, [S.L.], v. 14, n. 2, p. 23, 24 ago. 2020. Centro Universitário La Salle - UNILASALLE. <http://dx.doi.org/10.18316/rca.v14i2.5593>.

Devi, Saroj *et al.* Crop residue recycling for economic and environmental sustainability: The case of India. **Open Agriculture**, v. 2, n. 1, p. 486-494, 2017.

Feng, Haoliang *et al.* Effects of long-term application of organic materials on soil water extractable organic matter, fulvic acid, humic acid structure and microbial driving mechanisms. **Plant And Soil**, [S.L.], v. 501, n. 1-2, p. 323-341, 13 fev. 2024. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-024-06522-z>.

Fiehn, Oliver. Metabolomics – the link between genotypes and phenotypes. **Plant Molecular Biology**, [S.L.], v. 48, n. 1/2, p. 155-171, 2002. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1013713905833>.

Flores-Rojas, Alfredo Israel *et al.* Biomaterials based on chitosan/orange peel as a controlled release matrix for KNO₃: synthesis, characterization and their performance evaluation. **Iranian Polymer Journal**, [S.L.], v. 29, n. 11, p. 1007-1017, 26 ago. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13726-020-00858-w>.

Franco, Thaís Cristina *et al.* Seleção de bactérias promotoras do crescimento vegetal produtoras de enzima: efeito na decomposição de resíduos orgânicos. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 11, n. 3, 7 mar. 2022. Research, Society and Development. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i3.27037>.

Gallegos-Cedillo, Victor M. et al. Plant Agronomic Features Can Predict Quality and Field Performance: a bibliometric analysis. **Agronomy**, [S.L.], v. 11, n. 11, p. 2305, 15 nov. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy11112305>.

Gamache, Paul H. *et al.* Metabolomic applications of electrochemistry/Mass spectrometry. **Journal Of The American Society For Mass Spectrometry**, [S.L.], v. 15, n. 12, p. 1717-1726, 1 dez. 2004. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1016/j.jasms.2004.08.016>.

Giongo, Vanderlise *et al.* Optimizing multifunctional agroecosystems in irrigated dryland agriculture to restore soil carbon – Experiments and modeling. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 725, p. 138072, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138072>.

Giongo, Vanderlise *et al.* Estratégias para sequestro de carbono: experimentação de modelos. In: BRASIL. Vanderlise Giongo e Francislene Angelotti. Embrapa Semiárido (ed.). **Agricultura de baixa emissão de carbono em regiões semiáridas: experiência brasileira**. Brasília: Embrapa, 2022. Cap. 7. p. 113-126.

Giraldo, Gina Alejandra Gil. **Hidrofobização com óleos vegetais e ácido orgânico de celulose extraída de casca de aveia**. 2021. 110 f. Tese (Doutorado) - Curso de Biotecnologia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021.

Gomes, Lucas Carvalho *et al.* Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. **Geoderma**, [S.L.], v. 340, p. 337-350, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.007>.

Grossnickle, Steven C.; Macdonald, Joanne E. Seedling Quality: history, application, and plant attributes. **Forests**, [S.L.], v. 9, n. 5, p. 283, 22 maio 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/f9050283>.

Haase, Diane L. Understanding forest seedling quality: measurements and interpretation. **Tree Planters' Notes**, v. 52, n. 2, p. 24-30, 2008.

Hernandes Filho, Nilton Sérgio. **Diversidade metabólica e fisiológica em *Azospirillum brasilense* Ab-V5 cultivado em formulações inoculantes para a agricultura**. 2021. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Biotecnologia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021.

Hills, Colin D. *et al.* Valorisation of agricultural biomass-ash with CO₂. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 10, n. , 14 ago. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-70504-1>

Houghton, R. A.. Aboveground Forest Biomass and the Global Carbon Balance. **Global Change Biology**, [S.L.], v. 11, n. 6, p. 945-958, 13 maio 2005. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00955.x>.

INPE/PRODES. **Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/Programa de Monitoramento do Desmatamento da Amazônia Brasileira por Satélite**. 2022. http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/legal_amazon/rate s.

IPCC, 2023: **Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, (in press).

Jain, N.; Pathak, H.; Bhatia, A. Sustainable management of crop residues in India. *Current Advances in Agricultural Sciences (An International Journal)*, v. 6, n. 1, p. 1-9, 2014.

Jenkins, Stefan *et al.* Construction of soil defined media using quantitative exometabolomic analysis of soil metabolites. **Frontiers In Microbiology**, [S.L.], v. 8, p. 2618, 18 jun. 2017. Cold Spring Harbor Laboratory. <http://dx.doi.org/10.1101/151282>.

Jesus, M. V. *et al.* Produção de lipase utilizando manipueira como fonte alternativa de carbono. **Scientia Plena**. v. 12, n. 5, 2016.

Kosová, Klára *et al.* Biological Networks Underlying Abiotic Stress Tolerance in Temperate Crops—A Proteomic Perspective. **International Journal Of Molecular Sciences**, [S.L.], v. 16, n. 9, p. 20913-20942, 1 set. 2015. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijms160920913>.

Lal, R.. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. **Science**, [S.L.], v. 304, n. 5677, p. 1623-1627, 11 jun. 2004. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.1097396>.

Lima, Bárbara Brígida Pinho de. **Síntese de Hidrogéis a Base de Glicerol e Ácido Cítrico Enriquecido com Farinha de Ossos para Aplicação na Agricultura**. 2021. 67 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agroquímica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Rio Verde, 2021.

Liu, Xing *et al.* Soil carbon sequestration in paddy field and its simultaneous mineralization to supply available nutrients for the crops are affected by no-tillage with straw management: a meta-analysis. **Applied Soil Ecology**, [S.L.], v. 188, p. 104850, ago. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104850>.

Liu, Y.; Manzoor, N.; Han, M.; Zhu, K.; Wang, G. Biomaterial amendments improve nutrient use efficiency and plant growth. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, out. 2024. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2024586>

Lohmousavi, Sayed Majid *et al.* Synthesis and characterization of a novel controlled release nitrogen-phosphorus fertilizer hybrid nanocomposite based on banana peel cellulose and layered double hydroxides nanosheets. **Arabian Journal Of Chemistry**, [S.L.], v. 13, n. 9, p. 6977-6985, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.06.042>.

Lo Monaco, Paola Alfonsa Vieira *et al.* Mineralização Da Palha De Café Aplicada Superficialmente No Solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 30., 2019, S.L.. **Anais [...]**. S.L.: Abbes, 2019. p. 1-7.

Machado, Pedro L. O. de A.. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, [S.L.], v. 28, n. 2, p. 329-334, mar. 2005. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422005000200026>.

Marcelino, Paulo Ricardo Franco *et al.* Formulations of polymeric biodegradable low-cost foam by melt extrusion to deliver plant growth-promoting bacteria in agricultural systems. **Applied Microbiology And Biotechnology**, [S.L.], v. 100, n. 16, p. 7323-7338, 5 maio 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00253-016-7566-9>

Martins, Cláudia Rocha *et al.* Ciclos globais de carbono, nitrogênio e enxofre. **Cadernos temáticos de química nova na escola**, v. 5, p. 28-41, 2003.

Matos, A. T. **Poluição ambiental – Impactos no meio físico**. Viçosa: Imprensa Universitária, UFV, 2010. 260p

Menossi, M.; Cisneros, M.; Alvarez, V.A. *et al.* Current and emerging biodegradable mulch films based on polysaccharide bio-composites. A review. **Agronomy for Sustainable Development**. 41, 53. 2021. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00685-0>

Mendes, I. C. Sousa, D. M. G.; Reis Junior, F. B. *et al.* Bioanálise de solo: aspectos teóricos e práticos. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 10, p. 399- 462, 2019.

Mendes, Iêda de Carvalho *et al.* Tecnologia BioAS: uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo. Planaltina: **Embrapa Cerrados**, 2021. 50 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/224808/1/Tecnologia-Bioas-Doc-mentos-369.pdf>

Messa, Lucas Luiz *et al.* Spray-dried potassium nitrate-containing chitosan/montmorillonite microparticles as potential enhanced efficiency fertilizer. **Polymer Testing**, [S.L.], v. 81, p. 106196, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106196>.

Mitchell, Perry J. *et al.* Shifts in microbial community and water-extractable organic matter composition with biochar amendment in a temperate forest soil. **Soil Biology And Biochemistry**, [S.L.], v. 81, p. 244-254, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.11.017>.

Moreira, Rodrigo Santos. **Frações da matéria orgânica e estratégias para a avaliação da qualidade do solo em Sistema Plantio Direto**. 2018. 76 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agricultura Tropical e Subtropical, Instituto Agrônomo, Campinas, 2018.

Morgan, C.A. *et al.* Preservation of microorganisms by drying; A review. **Journal Of Microbiological Methods**, [S.L.], v. 66, n. 2, p. 183-193, ago. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mimet.2006.02.017>.

Muniz *et al.* Impactos das mudanças climáticas nas florestas tropicais. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 11, n. 2, p. 65-82, 2022.

Nardi, S., Pizzeghello, D., Muscolo, A., and Vianello, A. Physiological effects of humic substances on higher plants. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 34, p. 1527–1536, 2002. doi: 10.1016/S0038-0717(02)00174-178

Nicholson, J. K.; Lindon, J. C. Metabonomics. **Nature**, [S.L.], v. 455, p. 1054 - 1056, 23 out. 2008.

Ortiz, *et al.* A review of the interactions between biodiversity, agriculture, climate change, and international trade: research and policy priorities. **One Earth**, v. 4, n. 1, p. 88-101, 2021.

Overy, David P. *et al.* “Omics” Technologies for the Study of Soil Carbon Stabilization: a review. **Frontiers In Environmental Science**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 617952-617952, 30 abr. 2021. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fenvs.2021.617952>.

Ozório, Jefferson Matheus Barros *et al.* Estoque De Carbono E Agregação Do Solo Sob Fragmentos Florestais Nos Biomas Mata Atlântica E Cerrado. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, [S.L.], n. 53, p. 97-116, 3 fev. 2020. Zeppelini Editorial e Comunicação. <http://dx.doi.org/10.5327/z2176-947820190518>.

Pang, Zhiqiang *et al.* MetaboAnalyst 6.0: towards a unified platform for metabolomics data processing, analysis and interpretation. **Nucleic Acids Research**, v. 52, n. 1, p. 398-406, 8 abr. 2024. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1093/nar/gkae253>.

Penha, E. das M. *et al.* Aproveitamento de resíduos da agroindústria do óleo de dendê para a produção de lipase por *Aspergillus niger*. **Ciência Rural**, vol. 46, no. 4, p. 755–761, 2016.

Pereira, Magno S. *et al.* Mineralização do resíduo da pupunheira em condições de campo e laboratório. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 35, n. 5, p. 918-930, out. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v35n5p918-930/2015>.

Qiao, Dongling *et al.* Preparation and characterization of slow-release fertilizer encapsulated by starch-based superabsorbent polymer. **Carbohydrate Polymers**, [S.L.], v. 147, p. 146-154, ago. 2016. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.04.010>.

Reichstein, M; Carvalhais, N. Aspects of forest biomass in the earth system: Its role and major unknowns. **Surveys in Geophysics**, v. 40, p. 693-707, 2019.

Rekha, P.D. *et al.* Effect of free and encapsulated *Pseudomonas putida* CC-FR2-4 and *Bacillus subtilis* CC-pg104 on plant growth under gnotobiotic conditions. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 98, n. 2, p. 447-451, jan. 2007. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2006.01.009>.

Rumpel, C. *et al.* The 4p1000 initiative: Opportunities, limitations and challenges for implementing soil organic carbon sequestration as a sustainable development strategy. **Ambio**, v. 49, n. 1, p. 350-360, 2020.
<https://doi.org/10.1007/s13280-019-01165-2>.

Salimi, Mehri *et al.* A comprehensive review on starch: structure, modification, and applications in slow/controlled-release fertilizers in agriculture. **Carbohydrate Polymers**, [S.L.], v. 322, p. 121326, dez. 2023. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121326>.

Santibáñez, C.; Varnero, M. T.; Bustamante, M. Residual glycerol from biodiesel Manufacturing, waste or potential source of Bioenergy: A review. **Chilean Journal of Agricultural Research**, vol. 71, no. 3, p. 469–475, 2011.

Santos, E. L. T. *et al.* Quantificação de enzimas arilsulfatase e β -glicosidase em solos sob sistema agroecológico de produção no estado de Sergipe. **Cadernos de Agroecologia**, v. 19, n. 1, 2024.

Santos, Raul De Jesus. Impactos Socioambientais Do Descarte De Resíduos Sólidos Na Comunidade Rural Juçaral Do Bonfim Município De Paulo Ramos-MA. 2024. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Licenciatura em Educação do Campo, Universidade Federal do Maranhão, Bacabal, 2024.

Sharma, Shipra *et al.* Metabolic profiling and biomarkers identification in cluster bean under drought stress using GC-MS technique. **Metabolomics**, [S.L.], v. 20, n. 4, 27 jul. 2024. Springer Science and Business Media LLC.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11306-024-02143-w>.

Sicher, Richard C. *et al.* Responses of growth and primary metabolism of water-stressed barley roots to rehydration. **Journal Of Plant Physiology**, [S.L.], v. 169, n. 7, p. 686-695, maio 2012. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2012.01.002>.

Silva, E. E. da; Azevedo, P. H. S.; De-Polli, H. Determinação do carbono da biomassa microbiana do solo (BMS-C). Seropédica: **Embrapa Agrobiologia**, 2007. 6 p. (Embrapa Agrobiologia. Comunicado Técnico, 98)

Silva, D. B.; Souza, B. R. De; Antero, R. V. P. Produção biotecnológica de produtos de valor agregado utilizando glicerol residual proveniente da síntese de biodiesel. **Evidência - Ciência e Biotecnologia**, vol. 17, no. 2, p. 63–86, 2017.

Silva, F. M. *et al.* Rotas tecnológicas empregadas no aproveitamento de resíduos da indústria da soja. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**. v. 8, n. 1, p. 326-363, 2019.

Singha, L. Paikhomba; Pandey, Piyush. Rhizosphere assisted bioengineering approaches for the mitigation of petroleum hydrocarbons contamination in soil. **Critical Reviews In Biotechnology**, [S.L.], v. 41, n. 5, p. 749-766, 24 fev. 2021. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/07388551.2021.1888066>.

Smith, P. *et al.* Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils. **Soil**, [S.L.], v. 1, n. 2, p. 665-685, 19 nov. 2015. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/soil-1-665-2015>.

Souza, Felipe Ravelly Alves de *et al.* Biopolímeros Na Indústria De Alimentos: do aproveitamento de resíduos agroindustriais à produção de biopolímeros. **Avanços em Ciência e Tecnologia de Alimentos - Volume 4**, [S.L.], p. 370-388, 2021. Editora Científica Digital. <http://dx.doi.org/10.37885/210303531>.

Sparling, G.P.; West, A.W.. A direct extraction method to estimate soil microbial C: calibration in situ using microbial respiration and ¹⁴C labelled cells. **Soil Biology And Biochemistry**, [S.L.], v. 20, n. 3, p. 337-343, jan. 1988. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-0717\(88\)90014-4](http://dx.doi.org/10.1016/0038-0717(88)90014-4).

Sun, Hui *et al.* Biomaterials Technology for AgroFood Resilience. **Advanced Functional Materials**, [S.L.], v. 32, n. 30, 12 maio de 2022. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/adfm.202201930>.

Swenson, Tami L. *et al.* Untargeted soil metabolomics methods for analysis of extractable organic matter. **Soil Biology And Biochemistry**, [S.L.], v. 80, p. 189-198, jan. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.10.007>.

Tavares, T. S. *et al.* Influência de quitosana de baixa massa molar na manutenção da qualidade pós-colheita de morangos. **Caderno de Ciências Agrárias**. v. 9, n. 2, p. 36-47, 2017.

Tabatabai, M.A.. Soil Enzymes. **Sssa Book Series**, [S.L.], p. 775-833, 1994. Soil Science Society of America. <http://dx.doi.org/10.2136/sssabookser5.2.c37>.

Terrasán, C. R. F.; Carmona, E. C. (2015). Solid-state fermentation of brewer's spent grain for xylanolytic enzymes production by *Penicillium janczewskii* and analyses of the fermented substrate. **Bioscience Journal**, 31(6), 1826-1836, doi:10.14393/BJv31n6a2015-30044.

Tessmann, Marcelo Simões. **Bioprodutos De Resíduos Orgânicos: A Bioeconomia Como Uma Oportunidade Para Novos Empreendimentos Na Região Do Extremo Sul Da Bahia, Brasil**. 2021. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências e Tecnologias Ambientais, Universidade Federal do Sul da Bahia, Porto Seguro, 2021.

Tiossi, Fabiano Martin; Simon, Alexandre Tadeu. Economia Circular: suas contribuições para o desenvolvimento da sustentabilidade. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 11912-11927, 2021. Brazilian Journal of Development. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv7n2-017>.

Tripathi, Nimisha *et al.* Biomass waste utilization in low-carbon products: harnessing a major potential resource. **Npj Climate And Atmospheric Science**, [S.L.], v. 2, n. 1, 14 out. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41612-019-0093-5>.

Van Groenigen, Kees Jan *et al.* Soil C storage as affected by tillage and straw management: an assessment using field measurements and model predictions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [S.L.], v. 140, n. 1-2, p. 218-225, jan. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2010.12.008>.

Vance, E.D. *et al.* An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology And Biochemistry**, [S.L.], v. 19, n. 6, p. 703-707, jan. 1987. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](http://dx.doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6).

Vassilev, Nikolay *et al.* Formulation of Microbial Inoculants by Encapsulation in Natural Polysaccharides: Focus on Beneficial Properties of Carrier Additives and Derivatives. **Frontiers In Plant Science**, v. 11, 09 mar. 2020.

Vaz Júnior, Sílvio. Aproveitamento de resíduos agroindustriais: uma abordagem sustentável. **Brasília, DF: Embrapa Agroenergia**, 2020. 26 p.

Vieira, Luciana Cristina de Sousa. **Dinâmica Da Biomassa Da Floresta Amazônica Em Resposta A Estresse Hídrico**. 2011. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

Vinci, Giovanni *et al.* Effects of *Bacillus amyloliquefaciens* and different phosphorus sources on Maize plants as revealed by NMR and GC-MS based metabolomics. **Plant And Soil**, [S.L.], v. 429, n. 1-2, p. 437-450, 11 jun. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-018-3701-y>.

Wang, Mingxun *et al.* Sharing and community curation of mass spectrometry data with Global Natural Products Social Molecular Networking. **Nature Biotechnology**, [S.L.], v. 34, n. 8, p. 828-837, ago. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/nbt.3597>.

Wang, Dongdong *et al.* Correction to: split n and p addition decreases straw mineralization and the priming effect of a paddy soil. **Biology And Fertility Of Soils**, [S.L.], v. 55, n. 8, p. 835-835, 6 ago. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00374-019-01395-2>.

Ward, Collin P.; Cory, Rose M.. Chemical composition of dissolved organic matter draining permafrost soils. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, [S.L.], v. 167, p. 63-79, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2015.07.001>.

Wenneck, Gustavo Soares *et al.* Decomposição De Resíduos De Soja E Milho Na Região Centro-Oeste Paranaense. In: ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA, 11., 2019, S.L. **Anais Eletrônico**. S.L.: Epcc, 2019. Disponível em: <https://rdu.unicesumar.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/4026/GUSTAVO%20SOARES%20WENNECK.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 16 nov. 2023.

Withers, Emma *et al.* Use of untargeted metabolomics for assessing soil quality and microbial function. **Soil Biology And Biochemistry**, [S.L.], v. 143, p. 107758, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107758>.

Zeki, Özge Cansın *et al.* Integration of GC–MS and LC–MS for untargeted metabolomics profiling. **Journal Of Pharmaceutical And Biomedical Analysis**, [S.L.], v. 190, p. 113509, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpba.2020.113509>.

Zhang, Aihua *et al.* Modern analytical techniques in metabolomics analysis. **The Analyst**, [S.L.], v. 137, n. 2, p. 293-300, 2012. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c1an15605e>.

ANEXOS

ANEXO A

Caracterização química do solo utilizado no experimento*

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLO	
pH CaCl ₂	5,20
pH SMP	6,20
H ⁺ Al	4,39 cmolc dm ⁻³
Al ³⁺	0,01 cmolc dm ⁻³
Ca ²⁺	3,70 cmolc dm ⁻³
Mg ²⁺	0,98 cmolc dm ⁻³
K ⁺	0,70 mg dm ⁻³
P	12,60 mg dm ⁻³
N	0,47 g Kg ⁻¹
M.O.	1,83 g Kg ⁻¹
CTC pH 7,0	9,77 cmolc dm ⁻³
CTC efetiva	5,39 cmolc dm ⁻³
V%	55,10 %

*realizada antes da mistura com areia

ANEXO B

Tabela de caracterização de todos os metabólitos encontrados nas amostras

Nome IUPAC	Fórmula molecular	Massa molar (g/mol)	Classe química
(trans)-11-Icosenamida	$C_{21}H_{43}NO$	325,57	Amida de ácido graxo insaturado
(Z)-13-Docosenamida	$C_{22}H_{43}NO$	337,59	Amida de ácido graxo insaturado
1,3-Di-terc-butilbenzeno	$C_{14}H_{22}$	190,33	Hidrocarboneto aromático substituído
12-Metil-1-tetradecanol	$C_{15}H_{32}O$	228,41	Álcool graxo ramificado
1-Benzil-2-quinolona	$C_{16}H_{13}NO$	235,28	Composto heterocíclico aromático
1-Iodoctacosano	$C_{28}H_{57}I$	520,65	Haleto orgânico (iodeto de alquila)
2-Fenilciclohexanol	$C_{12}H_{16}O$	176,26	Álcool aromático cíclico
3,5-Di-terc-butil-4-hidroxibenzaldeído	$C_{15}H_{22}O_2$	234,34	Aldeído fenólico substituído
3-Bromobiciclo(3.2.2)nonan-2-ona	$C_9H_{13}BrO$	217,11	Cetona bicíclica bromada
3-Metoxi-3-fenilpropiofenona	$C_{16}H_{16}O_2$	240,30	Cetona aromática substituída
Ácido 3,4,5-triidroxibenzoico	$C_7H_6O_5$	170,12	Ácido fenólico (Ácido Gálico)
Ácido 3,4-diidroximandélico	$C_8H_8O_5$	184,15	Ácido fenólico contendo um grupo catecol e um grupo ácido mandélico
Ácido glicerofosfórico tetrametilsililado	$C_9H_{27}O_6PSi_4$	370,56	Éster fosfórico sililado

Ácido hexadecanoico	$C_{16}H_{32}O_2$	256,42	Ácido graxo saturado (Ácido Palmítico)
Ácido octadec-9-enoico	$C_{18}H_{34}O_2$	282,47	Ácido graxo insaturado (Ácido Oleico)
Ácido octadecanoico	$C_{18}H_{36}O_2$	284,48	Ácido graxo saturado (Ácido Esteárico)
Dodecametilciclohexasiloxano	$C_{12}H_{36}O_6Si_6$	444,94	Siloxano cíclico (resíduo da coluna de GC-MS)
Éster 2-etilhexílico de 2,2,2-tricloroetila	$C_{18}H_{33}Cl_3O_2$	396,81	Éster de ácido clorado
Éter decil-heptílico	$C_{17}H_{36}O$	256,47	Éter alifático
Éter docosil-pentílico	$C_{27}H_{56}O$	396,73	Éter alifático de cadeia longa
Éter eicosil-isobutílico	$C_{23}H_{50}O$	354,65	Éter alifático
Éter isopropil-tetradecílico	$C_{17}H_{36}O$	256,47	Éter alifático
Fenoxessimida	$C_{11}H_{11}NO_2$	189,21	Anticonvulsivante (succinimida aromática)
Ftalato de dietila	$C_{12}H_{14}O_4$	222,24	Éster de ftalato (éster de ácido benzênico dicarboxílico)
Fucosa	$C_6H_{12}O_5$	164,16	Monossacarídeo (desoxi-hexose)
Nonacosano	$C_{29}H_{60}$	408,80	Alcano linear
Octadecil 3-(3,5-di-terc-butil-4-hidroxifenil)propanoato	$C_{31}H_{52}O_3$	472,74	Éster fenólico de ácido carboxílico
Pentadecano	$C_{15}H_{32}$	212,41	Alcano linear
$\alpha,\alpha,\alpha',\alpha'$ -Tetrabenzil-1,4-piperazina-dipropanol	$C_{26}H_{36}N_2O_2$	408,58	Piperazina benzilada