

**UFRRJ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E
AMBIENTAL**

DISSERTAÇÃO

**USO DA BIOMASSA DE MICROALGAS CULTIVADAS EM
ÁGUAS RESIDUÁRIAS DA BOVINOCULTURA PARA
PRODUÇÃO DE RÚCULA (*Eruca vesicaria* (L.) Cav.)**

LAIZA SANTOS DAGNAISSER

2023



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E
AMBIENTAL**

**USO DA BIOMASSA DE MICROALGAS CULTIVADAS EM ÁGUAS
RESIDUÁRIAS DA BOVINOCULTURA PARA PRODUÇÃO DE RÚCULA (*Eruca
vesicaria* (L.) Cav.)**

LAIZA SANTOS DAGNAISSER

Sob a Orientação do Professor
HENRIQUE VIEIRA DE MENDONÇA

e Coorientação da Professora
ÉRIKA FLÁVIA MACHADO PINHEIRO

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestra em Engenharia Agrícola e Ambiental** no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental – PGEEAmb, área de concentração em Meio ambiente.

Seropédica
Rio de Janeiro - Brasil
Junho de 2023

A reprodução total ou parcial deste documento é permitida para fins técnicos, acadêmicos e científicos, desde que na reprodução sejam citados a autora, o título, a instituição e o ano da dissertação.

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D125u Dagnaisser, Laiza Santos, 1992-
Uso da biomassa de microalgas cultivadas em águas
residuárias da bovinocultura para produção de rúcula
(Eruca vesicaria (L.) Cav.) / Laiza Santos
Dagnaisser. - Nova Iguaçu, 2023.
94 f.: il.

Orientador: Henrique Vieira de Mendonça.
Coorientadora: Érika Flávia Machado Pinheiro.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Programa de pós-graduação em
engenharia agrícola e ambiental, 2023.

1. Biofertilizante de microalgas. 2.
Bovinocultura. 3. Biofixação de gás carbônico. 4.
Horticultura. 5. Química do solo. I. de Mendonça,
Henrique Vieira, 1984-, orient. II. Pinheiro, Érika
Flávia Machado, 1975-, coorient. III Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de pós
graduação em engenharia agrícola e ambiental. IV. Título.

O presente estudo foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código do Financiamento 001

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E
AMBIENTAL**

LAIZA SANTOS DAGNAISSER

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestra em Engenharia Agrícola e Ambiental** no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental – PGEAAmb, área de concentração em Meio ambiente.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 24/05/2023.

Henrique Vieira de Mendonça. Dr. UFRRJ
(Orientador)

Conan Ayade Salvador. Dr. UFRRJ

David Vilas Boas de Campos. Dr. EMBRAPA Solos



Emitido em 24/05/2023

HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 48/2023 - PPGEAAMB (12.28.01.00.00.00.40)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 04/07/2023 12:53)

CONAN AYADE SALVADOR
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEPTOENG (12.28.01.00.00.00.44)
Matrícula: ###318#2

(Assinado digitalmente em 04/07/2023 09:19)

HENRIQUE VIEIRA DE MENDONCA
COORDENADOR CURS/POS-GRADUACAO
PPGEAAMB (12.28.01.00.00.00.40)
Matrícula: ###331#3

(Assinado digitalmente em 04/07/2023 09:14)

DAVID VILAS BOAS DE CAMPOS
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.957-##

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/documentos/> informando seu número: **48**, ano: **2023**, tipo: **HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**, data de emissão: **04/07/2023** e o código de verificação: **16494f40cc**

DEDICATÓRIA

*Ao meu amoroso e pacífico avô, Celésio.
À minha forte e “tenebrosa” avó, Esmeralda.
Em memória,*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me permitir viver e me abençoar com sabedoria e força para lidar com os desafios da vida.

À minha mãe, Sonia, por todo apoio e liberdade para que eu me tornasse a mulher que sou hoje.

À todas as pessoas da minha família que direta ou indiretamente me ajudaram a chegar até aqui.

Ao meu companheiro de vida, Luiz Otávio, por ser minha fortaleza, meu abrigo, meu amor e minha paz. Sem você, minha vida seria menos feliz e esse mestrado não seria finalizado.

À minha filha, Neneca, por ser minha dose diária de felicidade, me fazer enxergar o que realmente importa em momentos de tristeza e me amar incondicionalmente.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro por, mais uma vez, me acolher e pela oportunidade de realização do mestrado. Em 2023, completamos 10 anos de relacionamento sério. A maioria dos dias, te amo.

Ao meu orientador, Prof. Henrique Mendonça, pela idealização deste trabalho, contribuições na dissertação e ajuda.

À minha coorientadora, Prof.^a Érika Pinheiro, pelos ensinamentos, incentivo, contribuições na dissertação, compreensão e acolhimento.

Ao professor David Campos e à Embrapa Solos pelas contribuições durante a execução deste mestrado, treinamento técnico, realização de análises laboratoriais, qualificação do projeto de pesquisa e defesa da dissertação.

Ao professor Conan Salvador pelas contribuições na defesa da dissertação.

Ao professor Leonardo Duarte pelas contribuições na qualificação do projeto de dissertação.

À Embrapa Agrobiologia e Fazendinha do Km 47, em especial à Dione e Sr. Cacá, que muito me ajudaram e ensinaram durante o experimento de campo.

Ao professor Renato Nunes por me ensinar e motivar a aprender sobre o uso do software R. Os conhecimentos aprendidos em sala de aula foram aplicados em diversos pontos desta dissertação.

Ao professor Marcos Bacis por permitir e orientar a coleta de solo ao final de sua aula de campo.

Aos colegas Luiz, João e Kellis pela ajuda indispensável durante a coleta do solo.

À equipe do Grupo de Pesquisa em Matéria Orgânica do Solo (GRUMOS), Vanessa, Raquel, Izabela, José, Jennifer e Manuelle por toda ajuda durante as análises químicas do solo.

À minha companheira de quarto no alojamento feminino da pós-graduação, Thalissa, pela infinita paciência, amizade e centenas de horas de conversas e desabafos.

Aos meus amigos Itaynara e Fagner por me ouvirem e acolherem em diversos momentos durante o mestrado.

Às amigas, Michele e Tereza, pela amizade acolhedora de sempre.

Às colegas de curso, Alice Lomeu e Beatriz Calixto, por toda ajuda e atenção.

A todos os amigos das turmas CAM 1X1 e Floresta 2012-2 pela amizade, dias e noites de estudo, festas, viagens, shows, provas, trabalhos e ensinamentos durante minha jornada pessoal, acadêmica e profissional.

RESUMO

DAGNAISSER, Laiza Santos. **Uso da biomassa de microalgas cultivadas em águas residuárias da bovinocultura para produção de rúcula (*Eruca vesicaria* (L.) Cav.).** 2023. 94p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.

As microalgas têm sido estudadas nos últimos anos devido ao seu potencial biotecnológico. O cultivo de microalgas em águas residuárias pode resultar na produção de um biofertilizante para culturas agrícolas. A aplicação da biomassa de microalgas como um biofertilizante para produção de hortaliças é um dos possíveis usos desse bioproduto. O objetivo geral do presente trabalho foi avaliar a utilização da biomassa de microalgas, cultivadas em água residuária de bovinocultura de leite com manejo orgânico (ARB), como biofertilizante no cultivo de rúcula. O primeiro capítulo teve como objetivo produzir, em ARB, biomassa de *Arthrospira platensis* DHR 20 (Spirulina) com características físicas, químicas e microbiológicas compatíveis para ser usada como biofertilizante líquido. Também, objetivou-se determinar a taxa de biofixação de CO₂ no processo de cultivo da microalga na ARB. A ARB foi biorremediada com microalgas em fotobiorreatores de coluna adaptados em garrafas de polietileno tereftalato de 2 L. A caracterização da ARB e da biomassa de microalgas foi realizada por meio das análises dos teores totais de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg), micronutrientes (Zn, Cu, B), teor de Na, Razão de Adsorção de Sódio (RAS), pH, teor de carbono orgânico total (C), relação C:N, condutividade elétrica (CE) e parâmetros microbiológicos (coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos, *Salmonella* sp.). O segundo capítulo teve como objetivo avaliar comparativamente o efeito do biofertilizante de biomassa de microalgas, oriundo da produção de microalgas em ARB, com a aplicação de ARB e com o uso de fonte convencional de nitrogênio (ureia) no desenvolvimento da parte aérea e das raízes da rúcula. Também, objetivou-se verificar as características microbiológicas nas folhas das rúculas ao final do cultivo, bem como, avaliar as alterações nas propriedades químicas do solo e na estrutura do solo após o experimento. O experimento foi composto por três tratamentos: T1 – Controle, com aplicação de ureia; T2 – ARB; T3 – Biofertilizante de biomassa de microalgas. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com sete repetições com quatro plantas em cada parcela experimental. O biofertilizante de biomassa de microalgas apresenta potencial nutritivo para plantas, principalmente como fonte de N e K, e como condicionador do solo. De acordo com a RAS, o biofertilizante de microalgas e a ARB não apresentam nenhum grau de restrição para uso no solo quanto a sodicidade e grau de restrição de uso ligeira a moderada quanto a salinidade. A taxa de biofixação média de CO₂ obtida permite concluir que o cultivo de *Spirulina* em ARB apresenta aptidão para a biofixação desse gás de efeito estufa. As plantas de rúcula produzidas nos três tratamentos apresentaram qualidade de desenvolvimento semelhantes segundo Índice de Qualidade de Dickson. Entretanto, as plantas fertilizadas com ureia apresentaram desempenho estatisticamente superior em altura, número de folhas, diâmetro do caule, área foliar e massa seca da parte aérea e maior concentração de N e Na nas folhas em comparação T2 e T3. As folhas de rúcula dos três tratamentos apresentaram resultado negativo para a presença de coliformes termotolerantes. A avaliação da estrutura do solo após o experimento indica que o biofertilizante de microalgas, bem como a ARB, pode agir como condicionador do solo, melhorando sua qualidade estrutural se comparado com o solo adubado com ureia.

Palavras-chave: biofertilizante; horticultura; bovinocultura orgânica; biofixação de CO₂.

ABSTRACT

DAGNAISSER, Laiza Santos. **Use of microalgae biomass cultivated in cattle wastewater for arugula (*Eruca vesicaria* (L.) Cav.) production.** 2023. 94p. Dissertation (Master in Agricultural and Environmental Engineering). Institute of Technology, Engineering Department, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.

Microalgae have been studied in recent years due to their biotechnological potential. The cultivation of microalgae in wastewater can result in the production of a biofertilizer for agricultural crops. The application of microalgae biomass as a biofertilizer for horticultural production is one of the possible uses of this bioproduct. The main objective of the present work was to evaluate the use of microalgae biomass, cultivated in organic managed cattle wastewater (CW), as biofertilizer in arugula cultivation. The first chapter aimed to produce, in CW, microalgae *Arthrospira platensis* DHR 20 (*Spirulina*) with compatible physical, chemical, and microbiological characteristics to be used as liquid biofertilizer. Determine the rate of CO₂ biofixation in the microalgae cultivation in CW was also an objective of this chapter. The CW was bioremediated with microalgae in column photobioreactors adapted in 2 L polyethylene terephthalate bottles. The characterization of the CW and microalgae biomass was performed by analyzing total macronutrient (N, P, K, Ca, Mg), micronutrients (Zn, Cu, B), Na content, Sodium Adsorption Ratio (SAR), pH, total organic carbon (C) content, C:N ratio, electrical conductivity (EC), and microbiological parameters (thermotolerant coliforms, viable helminth eggs, *Salmonella* sp.). The second chapter aimed to comparatively evaluate the effect of microalgae nitrogen biofertilizer, from microalgae production in ARB, with only ARB and with conventional nitrogen source (urea) on the development of the shoot and roots of arugula. It also aimed to verify the microbiological characteristics in the leaves of the arugula at the end of the cultivation, as well as to evaluate the changes in the chemical properties of the soil and in the soil structure after the experiment. The experiment consisted of three treatments: T1 - Control, with application of urea; T2 - CW; T3 - Microalgae biomass biofertilizer. The experimental design was entirely randomized with seven repetitions with four seedlings each experimental plot. The microalgae biomass biofertilizer has nutritional potential for plants, mainly as a source of N and K, and as a soil conditioner. According to the SAR, microalgae biofertilizer and ARB do not have any degree of restriction for soil use for sodicity and slight to moderate degree of restriction for salinity. The average of CO₂ biofixation obtained enables the conclusion that the cultivation of the microalga *Spirulina* in CW presents suitability for the biocapture of this Greenhouse gas. The arugula plants produced in the three treatments presented similar developmental quality according to Dickson's Quality Index. However, the plants fertilized with urea showed statistically superior performance in height, number of leaves, stem diameter, leaf area, and shoot dry mass, and higher concentration of N and Na in the leaves compared to T2 and T3. The arugula leaves of the three treatments showed negative results for the presence of thermotolerant coliforms. The evaluation of soil structure after the experiment indicates that microalgae biofertilizer, as well as ARB, can act as a soil conditioner, improving its structural quality when compared to soil fertilized with urea.

Keywords: biofertilizer; horticulture; organic cattle farming; CO₂ biofixation.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros físico-químicos e microbiológicos da ARB.....	32
Tabela 2. Comparação do percentual de carbono e da taxa da biofixação de CO ₂ em estudos com microalgas.....	35
Tabela 3. Parâmetros físicos, químicos e microbiológicos da biomassa de microalgas.....	37
Tabela 4. Caracterização morfológica e física do solo	52
Tabela 5. Caracterização química do solo	53
Tabela 6. Chave para atribuição das notas de qualidade estrutural para amostras de terra (Qec)	54
Tabela 7. Estatística descritiva para a Massa Fresca da Parte Aérea da rúcula nos diferentes tratamentos: T1 – Ureia; T2 – ARB; T3 – Biofertilizante de biomassa de microalgas.....	60
Tabela 8. Valores médios da caracterização física e análise química da fertilidade do solo após o experimento com rúcula	68
Tabela 9. Faixa de GDE e o tamanho médio dos agregados por tratamento.....	75
Tabela 10. Proporção relativa de agregados (%) na amostra e a nota da qualidade estrutural	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pré-cultivo das microalgas em ARB (A) antes e (B) depois de 3 dias de cultivo. ...	30
Figura 2. Biorremediação da ARB e cultivo das microalgas. A – Inóculo do pré-cultivo antes da adição de ARB; B – Início da biorremediação da ARB e cultivo das microalgas.	30
Figura 3. Densidade óptica e produção de biomassa de microalgas durante o cultivo.	34
Figura 4. Componentes do biofertilizante produzido após biorremediação de ARB com microalgas. A – ARB tratada com biomassa de microalgas; B – Biomassa de microalgas.	38
Figura 5. Bandeja de rúcula uma semana após a semeadura.	49
Figura 6. Ilustração do croqui do experimento.	50
Figura 7. Amostras de folhas de rúcula após homogeneização.	52
Figura 8. Experimento aos 26 DAT.	55
Figura 9. Plantas de rúcula no 26 DAT. A: Vasos 1 (T3), 2 (T2) e 3 (T1); B: Vasos 4 (T2), 5 (T3) e 6 (T3); C: Vasos 7 (T2), 8 (T3) e 9 (T2); D: Vasos 10 (T1), 11 (T2) e 12 (T1).	55
Figura 10. Plantas de rúcula no 26 DAT. A: Vasos 13 (T1), 14 (T3) e 15 (T2); B: Vasos 16 (T2), 17 (T3) e 18 (T1); C: Vasos 19 (T1), 20 (T1) e 21 (T3).	56
Figura 11. Altura média da parte aérea da rúcula por tratamento ao longo de 26 DAT (Tukey, p -value $\leq 0,05$).	57
Figura 12. Número médio de folhas por tratamento ao longo de 26 DAT (Tukey, p -value $\leq 0,05$).	58
Figura 13. DC por tratamento aos 26 DAT (Tukey, p -value $\leq 0,05$).	58
Figura 14. Área foliar por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).	59
Figura 15. Comprimento das raízes da rúcula por tratamento, aos 26 DAT.	59
Figura 16. Detalhe do comprimento das raízes de um vaso de cada tratamentos do experimento. A - T1; B - T2; C - T3.	60
Figura 17. Massa Seca da Parte Aérea da rúcula por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,01$).	61
Figura 18. Massa Fresca das Raízes por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).	61
Figura 19. MSR por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,01$).	62
Figura 20. Índice de Qualidade de Dickson por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).	62
Figura 21. Registro de pulgões nas folhas de rúcula.	64
Figura 22. Ocorrência de pulgões por vaso por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).	64
Figura 23. Ocorrência de pulgões por vaso ao longo do cultivo nos diferentes tratamentos.	65
Figura 24. Teor de N nas folhas de rúcula por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).	65
Figura 25. Teor de K nas folhas de rúcula por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).	66
Figura 26. Teor de Na nas folhas de rúcula por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).	67
Figura 27. Tubos de ensaio da análise microbiológica das folhas de rúcula.	67
Figura 28. pH do solo por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).	69
Figura 29. Teor de Ca^{2+} no solo por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).	69
Figura 30. Teor de Mg^{2+} no solo por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).	70
Figura 31. Teor de Na^{+} no solo por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).	71
Figura 32. Teor de K^{+} no solo por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).	72
Figura 33. Teor de P disponível no solo por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,01$).	72
Figura 34. Teor de $H^{+}+Al^{3+}$ no solo por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).	73
Figura 35. Soma de bases trocáveis no solo por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).	74
Figura 36. Capacidade de troca de cátions no solo por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).	74
Figura 37. Percentagem de saturação por bases no solo por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).	74
Figura 38. Amostras do solo por tratamento. A: T1; B: T2; C: T3.	76
Figura 39. Tamanho dos agregados do solo por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).	77

LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

AF	rea foliar
ARB	gua residuária de bovinocultura de leite com manejo orgânico
C:N	Relação carbono e nitrogênio
CCS	Captura e armazenamento de carbono
CE	Condutividade elétrica
Cepea	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CNA	Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil
CO ₂	Dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CW	Organic managed cattle wastewater
DAS	Dias após a semeadura
DAT	Dias após o transplântio
DBO	Demanda Biológica de Oxignio
DC	Diâmetro do caule
DIC	Delineamento experimental inteiramente casualizado
DQO	Demanda Química de Oxignio
EC	Electrical conductivity
FBR	Fotobiorreatores de coluna adaptados em garrafas PET de 2 L
GDE	Grau de desenvolvimento da estrutura dos agregados do solo
GEE	Gases de efeito de estufa
GHG	Greenhouse Gases
H	Altura
IQD	ndice de Qualidade de Dickson
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MFPA	Massa fresca da parte aérea
MSPA	Massa seca da parte aérea
MSR	Massa seca de raízes
MST	Massa seca total
NF	Número de folhas
NTK	Nitrogênio Kjeldahl Total
PET	Polietileno tereftalato
PIB	Produto interno bruto
RAFA	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente
RAFAALL	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente através de Leito de Lodo
RALF	Reator Anaeróbio de Leito Fluidificado
RAS	Ração de Adsorção de Sódio
SAR	Sodium Adsorption Ratio
SDA	Secretaria de Defesa Agropecuária
UASB	Upflow anaerobic sludge blanket
V (%)	Porcentagem de saturação por bases

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT	8
LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS	11
SUMÁRIO.....	12
1 INTRODUÇÃO GERAL	14
2 REVISÃO DE LITERATURA	16
1.1 Biorremediação de Águas Residuárias de Bovinocultura.....	16
1.2 Microalgas na Agricultura	17
1.3 Biofertilizantes de Microalgas	18
1.4 Mineralização da Matéria Orgânica no Solo	21
1.5 Biofixação de CO ₂	22
1.6 Bioeconomia do Uso de Biomassa de Microalgas.....	23
1.7 A cultura da rúcula.....	24
CAPÍTULO I. Produção de biofertilizante com biomassa de microalgas da biorremediação de águas residuárias de bovinocultura orgânica	25
RESUMO	25
ABSTRACT	26
Keywords: microalgal biomass production, microalgae biofertilizer, CO ₂ biofixation.	26
1 INTRODUÇÃO.....	27
2 OBJETIVO	28
3 MATERIAIS E MÉTODO	28
3.1 Água Residuária de Bovinocultura	28
3.2 Caracterização Física, Química e Microbiológica da Água Residuária de Bovinocultura	29
3.3 Cultivo de Microalgas na Água Residuária de Bovinocultura de Leite sob manejo Orgânica29	
3.4 Avaliação da Produção de Biomassa de Microalga.....	31
3.4.1 Crescimento da biomassa.....	31
3.4.1.1 Processo de secagem da biomassa	31
3.4.2 Biofixação de CO ₂	31
3.5 Caracterização Física, Química e Microbiológica da Biomassa de Microalgas	32
3.6 Dose de Aplicação do Biofertilizante e da ARB como Fonte de N.....	32
3.7 Análise de Dados	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	32

4.1	Caracterização Física, Química e Microbiológica da Água Residuária de Bovinocultura	32
4.2	Produção de Biomassa de Microalga	34
4.2.1	Crescimento da biomassa	34
4.2.2	Biofixação de CO ₂	35
4.3	Caracterização Física, Química e Microbiológica do Biofertilizante (ARB + Biomassa de Microalgas)	36
4.4	Dose de Aplicação do Biofertilizante e da ARB como Fonte de N	40
5	CONCLUSÃO	40
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
CAPÍTULO II. Uso da biomassa de microalgas na produção de rúcula		46
RESUMO		46
ABSTRACT		47
1	INTRODUÇÃO	48
2	OBJETIVOS	49
3	MATERIAIS E MÉTODO	49
3.1	Produção de Rúcula e Delineamento Experimental	49
3.1.1	Análise de parâmetros morfológicos	50
3.1.2	Análise química das folhas de rúcula	51
3.1.3	Análise microbiológica das folhas de rúcula	51
3.2	Análise do Solo	52
3.2.1	Caracterização química do solo após o cultivo da rúcula	53
3.2.2	Caracterização da estrutura do solo após o cultivo da rúcula	53
3.3	Análise Estatística dos Dados	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1	Produção de Rúcula	54
4.1.1	Análise de parâmetros morfológicos	56
4.1.1.1	Incidência de pragas	64
4.1.2	Análise química das folhas de rúcula	65
4.1.3	Análise microbiológica das folhas de rúcula	67
4.2	Análise do Solo	68
4.2.1	Caracterização química do solo após o cultivo	68
4.2.2	Caracterização da estrutura do solo após o experimento	75
5	CONCLUSÕES	77
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
7	CONCLUSÕES GERAIS	84
8	RECOMENDAÇÕES DE PESQUISA	84
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

1 INTRODUÇÃO GERAL

As microalgas têm sido estudadas nos últimos anos devido ao seu potencial biotecnológico. Na agricultura, os estudos apontam a aptidão para a geração de produtos tais como biofertilizantes, bioestimulantes e condicionadores do solo que contribuem na melhoria das propriedades físicas e químicas do solo, no aumento da produção e proteção das culturas contra pragas (ALOBWEDE; LEAKE; PANDHAL, 2019; ALVAREZ et al., 2021; COSTA; RAAIJMAKERS; KURAMAE, 2018; NISHA et al., 2018). A crescente necessidade mundial de intensificação na produção de alimentos, ao mesmo tempo em que os impactos negativos dos processos produtivos ao meio ambiente são evitados ou mitigados, amplia a demanda por soluções sustentáveis no setor. A urgência do tema é explícita considerando a ascensão de pesquisas sobre economia circular, práticas de manejo sustentável, redução das emissões de carbono e temas correlatos nos últimos anos (NEDER et al., 2019).

Atrelada a necessidade de intensificar de forma sustentável a produção agropecuária, existe a necessidade de gerir de forma responsável os seus resíduos. Atualmente, o tratamento de águas residuárias da produção animal representa um grande desafio devido às suas características potencialmente poluidoras. Entretanto, as características químicas e físicas desse efluente, tais como pH e concentração de nutrientes, o tornam um meio de cultura adequado para o cultivo de microalgas. O cultivo de microalgas em efluentes ricos em nutrientes, tal qual as águas residuárias de bovinocultura, é considerado uma via para a reciclagem e fornecimento de nutrientes para cultivos agrícolas. Após a biorremediação do efluente com as microalgas, a sua biomassa concentra macromoléculas, tais como proteínas, que conferem um potencial para uso como fertilizante nitrogenado (DE SOUZA et al., 2022).

Os fertilizantes são substâncias minerais ou orgânicas, naturais ou sintéticas, fornecedoras de um ou mais nutrientes para plantas (BRASIL, 2004). Já os biofertilizantes são produtos que contêm princípio ativo ou agente orgânico, isento de substâncias agrotóxicas, capazes de atuar, direta ou indiretamente, elevando a produtividade do todo ou de parte de plantas cultivadas (BRASIL, 2020). Uma alternativa para aplicação dos biofertilizantes é por meio da fertirrigação. A fertirrigação é uma técnica que viabiliza o uso fertilizantes na agricultura irrigada visando fornecer as quantidades de nutrientes requeridas pela cultura no momento adequado, via água de irrigação, para obtenção de altos rendimentos e produtos de qualidade. A técnica permite a distribuição onde ocorre maior densidade de raízes e possibilita ainda o ajuste às diferentes fases fenológicas das culturas, acarretando maior eficiência de uso e economia de fertilizante (CARRIJO et al., 2005; COELHO et al., 2010). A fertirrigação é uma alternativa de uso de fertilizantes nitrogenados para evitar perdas por volatilização, uma vez que estão dissolvidos em água (CARRIJO et al., 2005; COELHO et al., 2010). A aplicação da biomassa das microalgas na fertirrigação é benéfica as culturas, pois essa biomassa é especialmente rica em nitrogênio (ALVAREZ et al., 2021; DE MENDONÇA et al., 2018a). No entanto, atualmente o mercado de bioestimulantes de microalgas ainda não está estabelecido devido à falta de estudos, falta de procedimentos operacionais padronizados para produzir os bioprodutos e dificuldade em reproduzir resultados laboratoriais, por exemplo (KAPOORE; WOOD; LLEWELLYN, 2021).

Cada vez mais a cultura da rúcula vem ganhando espaço no mercado brasileiro e mundial de hortaliças, devido a sua composição nutricional contendo ferro, potássio, vitaminas e propriedades nutracêuticas (AGUIAR et al., 2014). Propaga-se por sementes plantadas em local definitivo ou em bandejas, sendo transplantadas posteriormente. Apresenta melhor produção sob temperaturas amenas e em regiões em que o verão é ameno, pode ser plantada durante o ano todo (VIEIRA, 2010).

Partindo da hipótese de que a biomassa de microalgas possui concentração de nutrientes e características físico-químicas relevantes para seu uso como biofertilizante, o objetivo geral

do presente estudo foi avaliar a utilização da biomassa de microalgas, cultivadas em águas residuárias de bovinocultura de leite com manejo orgânico (ARB), como biofertilizante para cultivo de rúcula (*Eruca vesicaria* (L.) Cav.). Em busca de responder ao objetivo da presente pesquisa, esta dissertação foi estruturada em dois capítulos. O primeiro capítulo intitulado: “Produção de biofertilizante com biomassa de microalgas na biorremediação de águas residuárias de bovinocultura.” buscou atingir ao objetivo específico de produzir, em ARB, biomassa de microalgas com características físico-químicas e microbiológicas compatíveis para ser usada como biofertilizante. Também foi obtida a taxa de biofixação de CO₂ no processo de cultivo da microalga. O segundo capítulo, intitulado: “Uso da biomassa de microalgas na produção de rúcula”, aprofunda a discussão sobre a aplicabilidade do biofertilizante produzido ao testá-lo em experimento em vasos para avaliar comparativamente o efeito do biofertilizante nitrogenado de microalgas, oriundo da produção de microalgas em ARB, com somente ARB e com fonte convencional de nitrogênio (ureia) no desenvolvimento da parte aérea e das raízes da rúcula, bem como, verificar as características microbiológicas nas folhas das rúculas. Também foram avaliadas as alterações nas propriedades químicas do solo e na estrutura do solo após o experimento.

2 REVISÃO DE LITERATURA

1.1 Biorremediação de Águas Residuárias de Bovinocultura

O agronegócio representou 27,4% do produto interno bruto (PIB) do Brasil em 2021, conforme calculado pelo Cepea, da Esalq/USP, em parceria com a CNA (CEPEA; CNA, 2022), sendo responsável pela geração de diversos resíduos, dentre eles, as águas residuárias dos criatórios de animais. Esses efluentes representam um grande desafio para a gestão ambientalmente correta dos recursos hídricos, devido à suas características potencialmente poluidoras, tais como os elevados níveis de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo.

As águas residuárias da bovinocultura para produção de leite, por exemplo, apresentam demanda química de oxigênio (DQO) da ordem de 2.000 mg L⁻¹, concentrações de nitrogênio total variando de 200 até 2.000 mg L⁻¹, amônia variando entre 110 e 1.200 mg L⁻¹ e fósforo total podendo atingir valores em torno de 600 mg L⁻¹ (DE MENDONÇA et al., 2018b; DE SOUZA et al., 2022; REN et al., 2021). A maioria dos nutrientes considerados úteis para o cultivo de microalgas são encontrados nas ARB (HUSSAIN et al., 2021). Ainda, as microalgas podem ser usadas de maneira simultânea no tratamento de águas residuais e produção de culturas agrícolas (ALVAREZ et al., 2021; HUSSAIN et al., 2021).

Algumas espécies de microalgas são mixotróficas, portanto podem ser produzidas por meio de duas estratégias principais – autotrófica ou heterotrófica (DE MENDONÇA et al., 2018b; SUN et al., 2008). *Arthrospira platensis* (spirulina), *Chlorella vulgaris* e a *Scenedesmus obliquus* são conhecidas como mixotróficas (DE SOUZA et al., 2022; ZHAI et al., 2017). O cultivo autotrófico é o método mais convencional, embora, atualmente, a produção heterotrófica esteja crescendo rapidamente (FERNÁNDEZ et al., 2021). O crescimento heterotrófico das microalgas requer fontes orgânicas de carbono, como os açúcares. Esse tipo de produção melhorou consistentemente o desempenho de crescimento e as concentrações celulares em comparação com a produção fotoautotrófica. Por outro lado, o cultivo heterotrófico de microalgas pode aumentar os custos de produção, devido à necessidade de uma fonte de carbono orgânico (exceto quando recuperado de águas residuárias) (BARROS et al., 2019; FERNÁNDEZ et al., 2021).

A produção de microalgas autotróficas, mais especificamente a fotoautotrófica, utiliza a luz como fonte de energia, juntamente com o gás carbônico (CO₂) e outros nutrientes (FRANCO et al., 2013; JIANG et al., 2011). O produto desse processo resulta na produção de biomassa e oxigênio. Durante a fotossíntese, as microalgas fixam CO₂ em monossacarídeos como fonte primária de energia ou polissacarídeos como materiais estruturais e de armazenamento. Essa capacidade de sequestro de CO₂ é uma nova abordagem para a redução da quantidade desse gás na atmosfera (HUSSAIN et al., 2021).

A biomassa produzida dessa forma já provou ser útil em uma série de aplicações, incluindo o tratamento de águas residuárias (ALVAREZ et al., 2021; DE MENDONÇA et al., 2018b; DOS SANTOS et al., 2021; FERNÁNDEZ et al., 2021; FERREIRA et al., 2021). Assim, o mecanismo mixotrófico permite um efeito sinérgico durante o cultivo das microalgas, aumentando a produtividade de biomassa de microalgas, enquanto simultaneamente promovem a biorremediação das mesmas (BHATNAGAR et al., 2011; DE MENDONÇA et al., 2018b; DE SOUZA et al., 2022).

O ponto chave do sistema de produção de microalgas é o fotobiorreator onde a biomassa é produzida, pois deve ser construído para interceptar ou receber a maior quantidade de luz possível e permitir que as células a utilizem de forma otimizada (FERNÁNDEZ et al., 2021). As condições fundamentais de cultivo que precisam ser controladas corretamente incluem a disponibilidade de nutrientes, temperatura, O₂ dissolvido e pH (BRINDLEY et al., 2016;

FERNÁNDEZ et al., 2021). O controle do pH é necessário para manter a estabilidade do sistema biológico. Usualmente, é realizado pela injeção de gases ricos em CO₂, que também fornecem carbono para evitar a limitação de carbono no processo (FERNÁNDEZ et al., 2021; POSADAS et al., 2015). Em condições de cultivo otimizadas, agitação e iluminação adequada também são fatores críticos na produção de biomassa, biossíntese de proteínas e, conseqüentemente, nos parâmetros de crescimento dos isolados (PRIYADARSHANI; THAJUDDIN; RATH, 2014).

As águas residuais podem ser biorremediadas de forma eficiente usando microalgas mixotróficas para gerar biomassa (CHO; PARK; KIM, 2017; HUSSAIN et al., 2021). Em resumo, carbono, nitrogênio e fósforo são os nutrientes necessários para produzir biomassa de microalgas. As microalgas assimilam esses nutrientes de efluentes como águas residuárias, melhorando os processos de tratamento, ao mesmo tempo produzem grandes quantidades de biomassa com insumos mínimos (ACIÉN et al., 2016). Além do potencial de acumular os nutrientes dos efluentes, elas também oferecem importantes benefícios em relação às macromoléculas que servem como matérias-primas promissoras para a produção agrícola mais sustentável (DE SOUZA et al., 2022; HUSSAIN et al., 2021).

Por outro lado, também podem acumular metais pesados (HUSSAIN et al., 2021), sendo a contaminação da biomassa uma preocupação no que se refere ao uso de águas residuárias para o crescimento de microalgas para produzir alimentos ou rações (MARKOU; ICONOMOU; MUYLAERT, 2016). LORENTZ et al. (2020) encontraram concentrações de metais na biomassa de microalgas abaixo dos valores especificados pela norma brasileira Resolução CONAMA 375 (BRASIL, 2006), que prevê critérios para o uso agrícola de lodos proveniente de tratamento de efluentes. É importante ressaltar as regras exigências, especificações, tolerâncias entre outras, dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes são estabelecidas na Instrução Normativa da SDA do MAPA N°61/2020 (BRASIL, 2020).

Compostos comerciais são encontrados naturalmente nas microalgas, incluindo uma variedade de proteínas, hidratos de carbono, lipídios, vitaminas, minerais, antioxidantes, fibras, e biomassa nutricional (BATISTA et al., 2013; DE MEDEIROS et al., 2020; FIELDS et al., 2020; MATOS et al., 2017; SPROLES et al., 2021). A proteína de algas é de boa qualidade, considerada superior a alguns materiais vegetais (trigo, feijão e arroz), mas de qualidade inferior em comparação com as proteínas animais (DE MEDEIROS et al., 2020; MATOS et al., 2017).

1.2 Microalgas na Agricultura

A agricultura moderna enfrenta o desafio de intensificar sustentavelmente sua produção para atender as demandas da crescente população mundial (ZHANG et al., 2021). Recuperar os nutrientes de fontes secundárias é uma alternativa para suprir a demanda por sustentabilidade no setor (NAGARAJAN et al., 2020). Neste contexto, as microalgas caracterizam-se por inúmeras aplicações na agricultura e como bioalternativas para promover uma produtividade sustentável (BELLO; SAADAOU; BEN-HAMADOU, 2021). Seu uso na forma de biofertilizantes e bioestimulantes pode promover a germinação de sementes e o crescimento adequado das plantas (ALVAREZ et al., 2021; BELLO; SAADAOU; BEN-HAMADOU, 2021; BULGARI et al., 2015; COLLA; ROUPHAEL, 2020; FERREIRA et al., 2021; SINGH et al., 2016).

As microalgas, tanto eucarióticas quanto cianobactérias, são microrganismos flexíveis que podem ser cultivados sem o uso de recursos valiosos necessários ao homem, como água potável ou terra arável (FERNÁNDEZ et al., 2021). As microalgas podem, com total respeito à saúde pública e ao meio ambiente, recuperar nutrientes e melhorar a qualidade da água a partir das águas residuárias da pecuária, promovendo uso sustentável desses recursos na agricultura. Além disso, os sistemas de microalgas podem ser promissores para o tratamento de efluentes

de animais em termos de custo, energia e eficiência ambiental. Além de promover o aumento da qualidade da água, a biomassa produzida pode ser utilizada como bioestimulantes e biopesticidas contribuindo para uma agricultura mais sustentável (FERNÁNDEZ et al., 2021).

O cultivo de microalgas inclui a recuperação de fósforo por absorção e assimilação e a recuperação de nitrogênio por assimilação em biomassa. Os bioprodutos (biofertilizante, biocombustível, alimentação animal) estão ligados a uma menor dependência de fertilizantes sintéticos, menores emissões de GEE, segurança energética, matéria-prima sustentável, e fonte sustentável de alimentos ricos em pigmentos e ácidos graxos (NAGARAJAN et al., 2020). Há uma tendência crescente de promover a aplicação de produtos naturais, em detrimento de minerais e produtos químicos, que não são apenas limitados, mas podem trazer graves problemas ambientais se contaminarem o solo e corpos d'água (por exemplo: eutrofização dos corpos hídricos, salinidade do solo e perda de biodiversidade) (BULGARI et al., 2015; FERREIRA et al., 2021).

O desenvolvimento de bioprodutos modernos para melhorar o rendimento e a qualidade das culturas agrícolas, minimizando a pegada de carbono rural, pode ser uma das principais aplicações das microalgas, cultivadas durante a biorremediação das águas residuais, inseridas numa abordagem circular de bioeconomia (FERREIRA et al., 2021). As microalgas podem ser consideradas como uma base sustentável para o processo de produção biológica de vários produtos essenciais, incluindo alimentos, combustíveis, rações e até mesmo medicamentos (FERNÁNDEZ et al., 2021; SPROLES et al., 2021). SHANTHI, PREMALATHA & ANANTHARAMAN (2021) indicam que cultivos de *Arthrospira platensis* poderiam ser usados como ração fonte de proteína na indústria da aquicultura. Como adubo, a utilização de biomassa de microalgas tem demonstrado ser uma alternativa na fertilização de pastagens, uma vez que o tratamento com biomassa de microalgas apresentou uma produtividade equivalente à de um adubo químico convencional (LORENTZ et al., 2020). Além do seu amplo aspecto de uso, as microalgas possuem baixo consumo de energia e espaço em sua produção, são seguras para consumo humano e animal e podem ser manipuladas para produzir uma diversidade de bioprodutos (SPROLES et al., 2021).

As principais vantagens do processo de cultivo das microalgas são: crescimento rápido (RAWAT et al., 2011; SCHMITZ; DAL MAGRO; COLLA, 2012); potencial para substituir fontes convencionais de proteínas (por exemplo, farinha de soja, farelo de arroz etc.); para biomassa na alimentação animal (bovinos, aves e peixes) (BECKER, 2007); não requer terra arável, portanto não compete pelo espaço com a produção de alimentos (WIJFFELS; BARBOSA, 2010); remove o CO₂ do ambiente; e, algumas microalgas podem tratar águas residuárias altamente poluídas (GONG; JIANG, 2011; MULBRY et al., 2008; SCHMITZ; DAL MAGRO; COLLA, 2012). Entre os principais desafios da aplicação industrial das microalgas está o custo da produção, quando não são utilizadas águas residuárias, já que elas requerem água e nutrientes para sua reprodução (DE SOUZA et al., 2019).

1.3 Biofertilizantes de Microalgas

A introdução de microalgas como produtos relacionados à agricultura é uma abordagem promissora para reduzir ou até substituir o uso de produtos químicos não renováveis, sem comprometer a produtividade das plantas (FERREIRA et al., 2021). As aplicações emergentes de microalgas incluem a produção de produtos relacionados à agricultura, como biofertilizantes, bioestimulantes e biopesticidas, tornando o cultivo de alimentos mais sustentável (FERNÁNDEZ et al., 2021). Atualmente, o maior desafio para desenvolver mais bioprodutos de microalgas em nível comercial é levar a produção de escala laboratorial para escala industrial (FERNÁNDEZ et al., 2021; SPROLES et al., 2021).

As microalgas são microrganismos com alta eficiência de conversão de substâncias inorgânicas (tais como CO_2 , NH_4^+ e NO_3^-) a compostos orgânicos (como carboidratos e proteínas) (DE MORAIS et al., 2019; QIE et al., 2019). As microalgas também contêm compostos valiosos, como aminoácidos, carboidratos, minerais, oligoelementos e fitohormônios, entre outros (COLLA; ROUPHAEL, 2020). Estudos científicos já indicam que sua biomassa pode melhorar o crescimento das plantas, agindo como um fertilizante orgânico de liberação lenta para fornecer nutrientes assimilados de águas residuais e evitar a contaminação de solos e corpos d'água com cargas extremas de nutrientes (ALVAREZ et al., 2021; COPPENS et al., 2016; FERREIRA et al., 2021).

A biomassa de microalgas é rica em aminoácidos proporcionando efeitos benéficos para as plantas (MICHALAK; CHOJNACKA, 2015). Os aminoácidos contêm um carbono alfa ligado a um grupo carboxila, a um grupo amino, ao hidrogênio e a um grupo variável que muda de aminoácido para aminoácido (DI DOMENICO ZIERO et al., 2020). Os aminoácidos atuam como bioestimulantes, por isso mesmo em baixas concentrações são vantajosas para as plantas, promovendo o desenvolvimento de raízes e frutos, entre outros (MICHALAK; CHOJNACKA, 2015). Além dos aminoácidos, as microalgas contêm fito-hormônios, compostos semelhantes a auxinas e a citocininas, que atuam como promotores de crescimento nas plantas. As auxinas promovem o desenvolvimento das raízes, aumentando assim a capacidade da planta de absorver água e nutrientes do solo e torná-las mais tolerantes a condições adversas de estresse (STIRK et al., 2002).

Fertilizantes minerais são a principal fonte de nutrientes para a produção de alimentos (STEWART et al. 2005). Atualmente, a produção de fertilizantes à base de fósforo e potássio é derivada da mineração de rochas finitas, porém essencial para manter os níveis atuais e futuros de produção de alimentos (SIPERT; COHIM; NASCIMENTO, 2020; MANNING, 2015). Nesse contexto, os fertilizantes provenientes de resíduos orgânicos podem ser uma alternativa para proporcionar benefícios ao solo, incluindo matéria orgânica e nutrientes (ZWETSLOOT et al., 2015).

Os fertilizantes nitrogenados são essenciais para o desenvolvimento de muitas culturas e necessitam de grande quantidade de energia fóssil para sua produção industrial (DE MENDONÇA et al., 2018b). Isso significa um alto custo em termos de uso de energia e impacto ambiental (MENDES JUNIOR; BUENO, 2015). A ureia é a forma amídica e sintética de fertilizante de nitrogênio mais utilizada no mundo (BONILLA CEDREZ et al., 2020). Porém, sua baixa eficiência, elevada taxa de volatilização e potencial para contaminação de corpos hídricos devido ao uso excessivo representam problemas. O uso de biofertilizantes na agricultura pode ajudar a contornar tal problema, ao reduzir a necessidade de fertilizantes nitrogenados convencionais como ureia, sulfato de amônio e nitrato de amônio, entre outros, com consequente economia de custos para a agricultura (DE MENDONÇA et al., 2018a; FERREIRA et al., 2021). Ademais, a comparação do uso da biomassa de uma mistura de microalgas (*Chlorella vulgaris*, *Monoraphidium contortum*, *Tetrastrum* sp., entre outras) produzidas em águas residuárias de bovinocultura como fertilizante biológico e o fertilizante químico N:P:K 20:0:20, demonstrou que ambos os tratamentos apresentaram produtividade similar (LORENTZ et al., 2020).

Os fertilizantes fosfatados são produzidos a partir de depósitos geológicos ricos em P (rocha fosfatada), uma fonte não renovável explorada, principalmente, em apenas três países do mundo (China, Estados Unidos da América e Marrocos) (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009). A situação atual dos fertilizantes fosfatados convencionais é particularmente crítica, pois os suprimentos globais de P mineral estão se esgotando e cerca de 80% de todo o P usado é perdido em águas residuárias ou de superfície, em países de clima temperado (ALVAREZ et al., 2021; CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009; SOLOVCHENKO et al., 2016). Em regiões de clima tropical, como no Brasil, a dependência das fertilizações fosfatados para

produção agrícola é mais acentuada, pois o P encontra-se adsorvido aos minerais de argila dos solos, indisponível para as plantas (ABREU et al., 2019; MACHADO et al., 2011). Devido à redução das reservas de rochas fosfatadas, a tendência é que o fósforo fique cada vez mais caro e que aumente a necessidade por novas fontes e métodos sustentáveis de reciclagem deste elemento (EGLE et al., 2015). As microalgas permitem a recuperação de P das águas residuárias e podem ser usadas como biofertilizantes ricos em P (SOLOVCHENKO et al., 2016). Ademais, o fósforo é vital para o crescimento de microalgas, pois faz parte de várias atividades metabólicas, na liberação de energia, e produção de lipídios, proteínas e coenzimas do corpo (HUSSAIN et al., 2021).

O potássio, assim com o nitrogênio e o fósforo, também é um nutriente essencial para a produção agrícola. Auditorias com os balanços de produção e consumo de fertilizantes fontes de N, P e K no mundo mostram que a produção de fertilizantes de K precisa dobrar para atender às necessidades da população global atual (MANNING, 2015). A redução das reservas físicas de sais de potássio e a alta volatilidade do preço do cloreto de potássio tem levantado preocupações sobre um cenário de escassez de K, principalmente em países que dependem da importação de fertilizantes para sustentar sua produção (SIPERT; COHIM; NASCIMENTO, 2020). Quatro países (Canadá, Rússia, Belarus e China) foram responsáveis por aproximadamente 80% da produção mundial de potássio em 2021 (USGS, 2022). O Brasil tem um importante papel no fluxo comercial global de K, pois é um dos principais produtores agrícolas do mundo e sustenta sua produção com um alto consumo de K importado já que os solos do país são naturalmente deficientes desse nutriente (KINPARA, 2003). Após identificação e quantificação de estoques e fluxos de potássio no Brasil, SIPERT, COHIM & NASCIMENTO (2020) consideram que o Brasil precisa buscar soluções baseadas na recuperação e reciclagem de K em resíduos e produtos fertilizantes que possam ser utilizados com segurança sem efeitos prejudiciais à qualidade dos solos e aos produtos agrícolas. A biomassa de microalgas se insere nesse contexto como uma alternativa aos fertilizantes minerais convencionais.

Além dos efeitos bioestimulantes, a biomassa de microalgas (ou compostos de microalgas) desempenha diversos outros efeitos nos solos e plantas, oferecendo a oportunidade para múltiplos produtos agrícolas derivados das microalgas no ramo do melhoramento do solo e produção e proteção de culturas (ALVAREZ et al., 2021; FERREIRA et al., 2021; RENUKA et al., 2018). Entretanto, a identificação de cepas de microalgas e/ou combinações de cepas com efeitos sinérgicos no crescimento da planta e qualidade do solo em diferentes tipos de solos, culturas e regiões agroclimáticas são necessárias para avaliar a sua eficiência agrônômica e a avaliação de diferentes métodos e períodos de aplicação são desafios para a ciência (ALVAREZ et al., 2021; COSTA et al., 2019).

As microalgas podem ser usadas de maneira simultânea no tratamento de águas residuárias e na produção de culturas agrícolas (ALVAREZ et al., 2021), pois, durante seu crescimento, elas consomem e acumulam em sua biomassa elementos potencialmente poluidores das águas residuárias (ex.: N e P). A biomassa de microalgas pode ser aplicada como biofertilizante por meio da fertirrigação, para fornecimento de nutrientes alternativamente aos fertilizantes convencionais, e como biopesticida, protegendo a planta contra patógenos, principalmente fungos ou bactérias (FERNÁNDEZ et al., 2021). Possíveis dificuldades da aplicação de microalgas por fertirrigação, tais como obstrução dos tubos ainda precisam de mais estudos. A fertirrigação é uma técnica para disposição de fertilizantes na agricultura irrigada, possibilitando o aumento da eficiência, pois permite o controle da aplicação conforme a necessidade da cultura. O tempo de chegada dos nutrientes às raízes das plantas é reduzido, pois o fertilizante está em solução aquosa que, quando aplicada ao solo, rapidamente compõe sua solução nutritiva. Diferentemente da fertilização convencional do solo com nutrientes sólidos

e que necessita de aporte posterior de água para sua incorporação na solução do solo (COELHO et al., 2010).

Um estudo analisando a germinação e o crescimento de pepino (*Cucumis sativus*), cevada (*Hordeum vulgare*), trigo (*Triticum aestivum*), soja (*Glycine max*), agrião (*Nasturium officinale*) e tomate (*Lycopersicon esculentum*) com aplicação de biomassa de microalgas verificou um efeito geral positivo nas raízes das plantas, com comprimentos maiores que o controle. No entanto, o efeito da fertilização do solo com microalgas no desenvolvimento da parte aérea das plantas não foi significativo (FERREIRA et al., 2021). Outros estudos já evidenciaram que os polissacarídeos de microalgas promovem o crescimento das plantas, a absorção de nutrientes e estendem a tolerância das plantas ao estresse hídrico (EL ARROUSSI et al., 2018; EL-NAGGAR et al., 2020; FARID et al., 2019; FERREIRA et al., 2021). Em contrapartida, estudos indicam que biofertilizantes de microalgas aumentam o crescimento de plantas, a produtividade e/ou rendimento de culturas de trigo, tomate, cebolinha, espinafre, arroz, milho e alface em comparação com a dose recomendada de fertilizantes convencionais e/ou tratamento controle (sem fertilizantes) (RENUKA et al., 2016; GARCIA-GONZALEZ E SOMMERFELD, 2016; KIM et al., 2018; WANG et al., 2018; DINESHKUMAR et al., 2019; PUGLISI et al., 2020).

1.4 Mineralização da Matéria Orgânica no Solo

A matéria orgânica pode ser definida como o material de origem vegetal e animal incorporado no solo ou disposto sobre sua superfície, na forma viva ou nos vários estágios de decomposição, excluindo a parte aérea das plantas (LAL, 2006). A disposição de materiais orgânicos no solo estimula o desenvolvimento de microrganismos devido a maior disponibilidade de nutrientes e carbono orgânico (CAS, 2009). Os nutrientes em suas formas orgânicas são disponibilizados no solo apenas com a mineralização do material orgânico. A estimativa da disponibilização de nutrientes das substâncias orgânicas tem sido obtida a partir do valor da taxa de mineralização do material orgânico (MATOS; MATOS, 2017).

O processo biológico de mineralização de nutrientes é realizado principalmente por microrganismos que atuam na decomposição dos materiais orgânicos, transformando-os em inorgânicos (TRASAR-CEPEDA; GIL-SOTRES; LEIROS, 2007; MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). As características do solo também influenciam o processo de mineralização dos compostos orgânicos, pois o crescimento e reprodução dos microrganismos são significativamente afetados pela textura, tipo de argila, quantidade de nutrientes, pH, oxigênio disponível, umidade do solo e temperatura (STEINER; GARCIA; ZECH, 2009; FIERER; JACKSON, 2006; LEITE; MENDONÇA, 2003).

O potencial de uso de resíduos orgânicos na agricultura moderna depende do manejo e da capacidade desse material orgânico em disponibilizar nutrientes no momento adequado (OLIVEIRA et al., 2018). Por isso, é importante conhecer a dinâmica de decomposição e liberação dos nutrientes dos resíduos orgânicos. Além disso, é interessante criar estratégias para sincronizar a mineralização dos nutrientes com a fase de maior demanda pelas culturas, evitando, assim, a rápida ou lenta mineralização sem aproveitamento adequado pelas plantas, por exemplo (MENEZES; SALCEDO, 2007; PITTA et al., 2012).

A fração mineralizada do resíduo orgânico deve ser considerada na definição das doses a serem aplicadas ao solo, vislumbrando a satisfação das necessidades da cultura, sem, contudo, disponibilizar quantidades que representem um risco de contaminação de solos e águas subterrâneas (PAULA, 2012; PAULA et al., 2013; MATOS; MATOS, 2017). A relação C:N pode indicar a suscetibilidade do material à decomposição e à liberação do nutriente (GIACOMINI et al., 2003; WISNIEWSKI; HOLTZ, 1997). Relações C:N menores que 30 favorecem a atividade microbiana e a mineralização dos materiais orgânicos no solo

(MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Porém, a relação C:N nem sempre é o fator determinante no processo de decomposição (MAGALHÃES et al., 2018). A composição bioquímica, como as concentrações de celulose, lignina e gorduras do material orgânico, também é determinante para a velocidade de decomposição (SOUTO et al., 2005). Em águas residuárias, são considerados prontamente disponíveis os nutrientes que estão na forma mineral no momento da aplicação ao solo (ex.: potássio e boro) e todos aqueles que fizerem parte de cadeias orgânicas, tais como nitrogênio, enxofre, fósforo, cálcio e magnésio, serão disponibilizados à medida que o resíduo orgânico for degradado (MATOS; MATOS, 2017).

Com relação ao nitrogênio, a mineralização pode ser definida como a conversão do nitrogênio de proteínas, aminoácidos, açúcares e ácidos nucleicos, mediado pelos animais e microrganismos do solo, em N inorgânico (CHAPIN III et al., 2011; HUTCHISON; WALWORTH, 2007), sob influência de fatores como umidade do solo, tipo de solo, microrganismos, temperatura, pH entre outros (ANDREOLI, 2001; BOEIRA et al., 2002). A taxa de mineralização do nitrogênio varia de acordo com a composição do resíduo orgânico e os processos essencialmente microbiológicos necessários para a mineralização que, por sua vez, são influenciados pelas características do próprio resíduo e fatores edafoclimáticos (CARNEIRO et al., 2013).

1.5 Biofixação de CO₂

As microalgas contribuem para a sustentabilidade ambiental mundial, especialmente através da transformação de CO₂ em O₂, uma vez que o CO₂ e a luz solar podem ser utilizados para o crescimento das microalgas, presume-se geralmente que o cultivo de biomassa é sustentável (FERNÁNDEZ et al., 2021). Durante a fotossíntese, as microalgas fixam o CO₂ em monossacarídeos ou polissacarídeos, como fonte primária de energia e como materiais estruturais e de armazenamento, respectivamente. Essa capacidade de sequestro de CO₂ é uma nova abordagem para reduzir a quantidade de CO₂ na atmosfera (HUSSAIN et al., 2021). Entre as várias técnicas de captura de CO₂, a biofixação de microalgas por fotossíntese é uma tecnologia promissora devido à eficiência desses microrganismos na transformação desse gás em compostos orgânicos, utilizando-o como nutriente no meio de cultura (DE MORAIS et al., 2019). Adicionalmente, o processo de captura e armazenamento de carbono (CCS) realizado por microalgas é considerado a mais eficiente bio-captura de CO₂ comparativamente a outras tecnologias tais como absorção, adsorção, e separação de membranas (FERNÁNDEZ et al., 2021). Atualmente, a melhor espécie de microalgas fixadora de CO₂ descritas na literatura é a *Arthrospira platensis* (DE MENDONÇA et al., 2022).

Amplamente mencionadas na literatura por serem úteis na biorremediação de águas residuárias, as microalgas geram o oxigênio necessário às bactérias para decompor a matéria orgânica, permitindo a recuperação dos nutrientes contidos nas águas residuárias e convertendo-os em biomassa apropriada para bioprodutos, bioenergia e materiais que se enquadram no âmbito da bioeconomia (FERNÁNDEZ et al., 2021; GONÇALVES; PIRES; SIMÕES, 2017; PATEL et al., 2019). O cultivo de microalgas em sistemas de águas residuárias pode levar à diminuição ou mesmo à neutralização do impacto da biorremediação no que diz respeito ao consumo de energia e liberação de GEE, como o CO₂, para o ambiente (ACIÉN et al., 2016; FERNÁNDEZ et al., 2021). Serviços ambientais desempenhados durante o cultivo das microalgas, tais como redução das emissões de GEE e biorremediação de águas residuárias, oferecerem várias possibilidades de apoio à bioeconomia dado o seu metabolismo flexível e boas taxas de produção de biomassa (DOLGANYUK et al., 2020; FERNÁNDEZ et al., 2021).

DE MENDONÇA et al. (2022) realizou uma análise de balanço de massa para estimar a produção de biomassa de microalgas em uma fábrica de laticínios brasileira de tamanho médio com uma produção anual de 328.500.000 L de águas residuárias de gado de leite por ano

e biofixação de 167,54 t ano⁻¹ de CO₂. Considerando a produção de biomassa de 2,3 g L⁻¹ e o teor de 56% de proteínas, é possível estimar que a quantidade de biofertilizante bruto produzida pelo tratamento seria de 423,1 t ano⁻¹. O volume anual de leite produzido no Brasil gera cerca de 100,2 bilhões de litros para as águas residuárias de bovinocultura leiteira (DE MENDONÇA et al., 2022; ROCHA; CARVALHO; RESENDE, 2020). Assim, seria possível atingir a produção de 129.057,6 t ano⁻¹ de biofertilizantes de microalgas no Brasil.

1.6 Bioeconomia do Uso de Biomassa de Microalgas

Bioeconomia implica a exploração e aproveitamento de biorecursos, o que envolve o uso da biotecnologia na criação de novos bioprodutos de valor econômico (ONI; OZIEGBE; OLAWOLE, 2019) e é definida pelo uso, processos e produção de produtos que possam substituir os combustíveis fósseis (KERSHAW et al., 2021). A biotecnologia microalgal contribui para a bioeconomia global, produzindo biomassa de alto valor para aplicações relacionadas com o ser humano, tais como alimentos, cosméticos e produtos farmacêuticos (BHALAMURUGAN; VALERIE; MARK, 2018; MAGALHÃES et al., 2021). Porém, faltam tecnologias inovadoras para reciclagem de nutrientes e práticas agrícolas conservacionistas para apoiar o ecossistema agrícola e melhorar a eficiência da economia circular de fertilizantes (SHARMA et al., 2021).

Microalgas cultivadas em fluidos ricos em nutrientes, como as águas residuárias de bovinocultura, são consideradas uma alternativa para reciclagem e fornecimento de nutrientes para o crescimento de culturas (MULBRY et al., 2008; SOLOVCHENKO et al., 2016). Da perspectiva da bioeconomia circular, as microalgas podem recuperar os nutrientes das águas residuárias, sendo uma fonte para produção de biocombustíveis, o que pode gerar mais rendimentos para as instalações de produção (FERREIRA et al., 2018, 2021). Os benefícios da biorremediação e uso da biomassa microalgal apontam para o sucesso da economia circular desse manejo, reciclando os nutrientes de volta para o solo na produção agrícola (ALVAREZ et al., 2021).

Embora apresente efeitos positivos no desenvolvimento, crescimento e rendimento das culturas, a implementação comercial de bioestimulantes oriundos de microalgas, como os biofertilizantes podem ser considerados, ainda é limitada pela falta de pesquisas científicas e pelo custo de produção desconhecido. Contudo, ao considerar o preço crescente dos fertilizantes minerais, a resistência aos agrotóxicos e os efeitos das mudanças climáticas, as microalgas têm um enorme potencial para uso agrícola e oferecem a oportunidade de tornar a agricultura mais sustentável e resiliente (KAPOORE; WOOD; LLEWELLYN, 2021).

Agricultores e consumidores estão dispostos a produzir e consumir produtos seguros e biológicos. No entanto, o mercado de bioestimulantes de microalgas carece de credibilidade e não está bem estabelecido devido a razões como a falta de estudos, falta de procedimentos operacionais padronizados para produzir os bioprodutos, períodos mais longos de desenvolvimento de produtos, poucas patentes, dificuldade em reproduzir resultados laboratoriais, e entraves ao comércio internacional devido a regulamentações mais restritas e mais complexas que variam de país para país (KAPOORE; WOOD; LLEWELLYN, 2021). Uma estratégia adequada para aumentar a relação custo-benefício de um sistema de cultivo de microalgas é utilizar recursos alternativos, sustentáveis e de baixo custo, como os resíduos (BARONE et al., 2019; DE MEDEIROS et al., 2020). Entretanto, algumas espécies de microalgas podem não apresentar crescimento satisfatório em meio preparado com resíduos. Por isso, o conhecimento sobre espécies adaptáveis a esses meios alternativos é indispensável para garantir a produção de biomassa (DE MEDEIROS et al., 2020).

1.7 A cultura da rúcula

A área explorada com hortaliças no Brasil é estimada em 1,5 milhões de hectares (IBGE, 2019). Dentre as hortaliças, a rúcula se destaca como um alimento rico em ferro, cálcio, fósforo, vitaminas A e C. Além de servir como alimento, possui propriedades nutracêuticas e depurativas (AGUIAR et al., 2014; VIEIRA, 2010).

Originária da região Mediterrânea e conhecida desde a antiguidade, a rúcula tem seu primeiro registro datado do século I, encontrado no Herbário Grego, de autoria de Dioscorides (41-68 d.C.) (AGUIAR et al., 2014). Esta hortaliça é comumente encontrada nas regiões de colonização italiana no Brasil, devido à sua introdução no país ser oriunda da migração italiana (MOURA et al., 2008). A rúcula conquistou maior espaço no mercado brasileiro e mundial de hortaliças, não apenas por conta da sua composição nutricional, mas, também, pela presença de metabólitos secundários denominados glicosinolatos, com reconhecidas propriedades antioxidantes e antitumorais (UNIRIO, 2022).

Pertencentes à família Brassicaceae, três espécies de rúcula são utilizadas no consumo humano: *Eruca sativa* Miller, *Diplotaxis tenuifolia* (L.) DC. e *Diplotaxis muralis* (L.) DC. A espécie mais cultivada no Brasil é a *Eruca sativa* Miller (heterotípico de *Eruca vesicaria* (L.) Cav) (AGUIAR et al., 2014). Essa espécie se apresenta como uma erva ereta, com folhas de cor verde escura, espatuladas e/ou recortadas, dispostas em roseta. Possui inflorescência racemosa, com flores tetrâmeras de pétalas amareladas, nervuras marrons avermelhadas e estames amarelos. Por ter flores que se abrem de baixo para cima no eixo principal, esse tipo de inflorescência é caracterizado pela floração dos ramos mais jovens e próximos ao ápice simultaneamente à frutificação nos ramos mais velhos e afastados deste. Seu fruto é do tipo síliqua, semelhante a uma vagem com aparência pouco inflada quando jovem, mas que se torna seco e deiscente quando maduro (UNIRIO, 2022).

A propagação é feita por sementes plantadas em local definitivo ou em bandejas, sendo transplantadas posteriormente. A colheita se inicia de 40 a 60 dias após a semeadura, podendo-se colher os rebrotamentos (VIEIRA, 2010). Para seu desenvolvimento e qualidade das folhas, as temperaturas mais adequadas situam-se entre 15 e 25°C. Em temperaturas elevadas as folhas ficam fibrosas e pungentes. Sob alta pluviosidade, as plantas apresentam menor tamanho e podem apresentar folhas amareladas e danificadas (AGUIAR et al., 2014). Nas regiões em que o verão é ameno, pode ser plantada durante o ano todo (VIEIRA, 2010). Seu consumo ocorre, em geral, após mínimo processamento que consiste em lavagem das folhas e higienização (GONZALEZ; AYUB; REGHIN, 2006; SIGRIST, 2002).

CAPÍTULO I. Produção de biofertilizante com biomassa de microalgas da biorremediação de águas residuárias de bovinocultura orgânica

RESUMO

A bovinocultura leiteira e a produção de fertilizantes compartilham as robustas metas mundiais de reduzir emissões de GEE e alcançar a sustentabilidade de suas cadeias produtivas. As microalgas são biofixadoras de CO₂, um GEE, e a biomassa gerada durante a biorremediação da água residuária de bovinocultura de leite com manejo orgânico (ARB) pode ser utilizada como bioproduto no âmbito agrícola. Portanto, o objetivo foi produzir, em ARB, biomassa de *Arthrospira platensis* DHR 20 (Spirulina) com características físicas, químicas e microbiológicas compatíveis para ser usada como biofertilizante líquido. Também, objetivou-se determinar a taxa de biofixação de CO₂ no processo de cultivo da microalga na ARB. A ARB foi biorremediada com microalgas em fotobiorreatores de coluna adaptados em garrafas de polietileno tereftalato de 2 L. A caracterização da ARB e da biomassa de microalgas foi realizada por meio das análises dos teores totais de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg), micronutrientes (Zn, Cu, B), teor de Na, Razão de Adsorção de Sódio (RAS), pH, teor de carbono orgânico total (C), relação C:N, condutividade elétrica (CE) e parâmetros microbiológicos (coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos, *Salmonella* sp.). A produtividade volumétrica de biomassa foi em média de 0,13 g L⁻¹d⁻¹, a taxa específica de crescimento máxima foi de 0,16, e o tempo de duplicação foi de 4,4 d. As doses de aplicação de ARB e biofertilizante de microalgas para fornecimento de 120 kg N ha⁻¹ por meio da fertirrigação foram de 1.756,32 m³ ha⁻¹ e 1.063,61 m³ ha⁻¹, respectivamente. As concentrações de N total e K no biofertilizante de microalga foram 187,5 mg L⁻¹ e 92,9 mg L⁻¹, respectivamente. A biomassa de microalgas produzida possui características físicas, químicas e microbiológicas para uso como biofertilizante, principalmente, de nitrogênio e potássio. De acordo com a RAS, o biofertilizante de microalgas e a ARB não apresentam nenhum grau de restrição para uso no solo quanto a sodicidade e grau de restrição de uso ligeira a moderada quanto a salinidade. A taxa de biofixação média de 0,22 g CO₂ L⁻¹ d⁻¹ obtida permite concluir que o cultivo da microalga *Arthrospira platensis* DHR 20 em ARB apresenta aptidão para a biocaptura desse GEE.

Palavras-chave: produção de biomassa microalgal, biofertilizante de microalgas, biofixação de CO₂.

ABSTRACT

The cattle dairy farming and fertilizer production share the robust global goals of reducing GHG emissions and achieving sustainability of their supply chains. Microalgae are biofixers of CO₂, a GHG, and the biomass generated during CW bioremediation can be used as bioproducts in the agricultural field. Therefore, the objective was to produce, in CW, biomass of *Arthrospira platensis* DHR 20 (Spirulina) with compatible physical, chemical, and microbiological characteristics to be used as liquid biofertilizer. Determine the rate of CO₂ biofixation in the microalgae cultivation in CW was also an objective of this chapter. The CW was bioremediated with microalgae in column photobioreactors adapted in 2L polyethylene terephthalate bottles. The characterization of the CW and microalgae biomass was performed by analyzing total macronutrient (N, P, K, Ca, Mg), micronutrients (Zn, Cu, B), Na content, Sodium Adsorption Ratio (SAR), pH, total organic carbon (C) content, C:N ratio, electrical conductivity (EC), and microbiological parameters (thermotolerant coliforms, viable helminth eggs, *Salmonella* sp.). The volumetric biomass productivity (P) averaged was 0.13 g L⁻¹d⁻¹, the maximum specific growth rate ($\mu_{m\acute{a}x}$) was 0.16, and the doubling time (Td) was 4,4 d. The application rates of CW and microalgae biofertilizer for supplying 120 kg N ha⁻¹ by fertigation were 1756.32 m³ha⁻¹ and 1063.61 m³ha⁻¹, respectively. The concentrations of total N and K in the microalgae biofertilizer were 187.5 mg L⁻¹ and 92.9 mg L⁻¹, respectively. The microalgae biomass produced from the bioremediation of CW has physical, chemical, and microbiological characteristics for use as a biofertilizer mainly as a source of nitrogen and potassium. According to the SAR, microalgae biofertilizer and ARB do not have any degree of restriction for soil use for sodicity and slight to moderate degree of restriction for salinity. The average biofixation rate of 0.22 g CO₂ L⁻¹ d⁻¹ obtained by the research enables the conclusion that the cultivation of the microalga *Arthrospira platensis* DHR 20 in CW presents suitability for the biocapture of this GHG.

Keywords: microalgal biomass production, microalgae biofertilizer, CO₂ biofixation.

1 INTRODUÇÃO

A bovinocultura leiteira e a produção de fertilizantes compartilham as robustas metas mundiais de reduzir emissões de GEE e alcançar a sustentabilidade de suas cadeias produtivas. A produção leiteira no Brasil cresceu continuamente até 2014, quando atingiu 35,1 bilhões de litros e a partir de então vem oscilando anualmente em torno desse valor. Nesta década, o principal desafio do setor está relacionado à agenda ambiental devido ao forte impacto negativo dos resíduos do processo produtivo, neste quesito (MARTINS, 2022). Os efluentes da bovinocultura de leite de gado confinado, por exemplo, representam um problema para a gestão ambientalmente correta dos recursos hídricos, pois suas características físicas e químicas são potencialmente poluidoras. As águas residuárias de bovinocultura para produção de leite apresentam DQO de aproximadamente 2.000 mg L⁻¹, concentrações de nitrogênio total que podem chegar à 2.000 mg L⁻¹, amônia de até 1.200 mg L⁻¹ e fósforo total com valores em torno de 600 mg L⁻¹ (DE MENDONÇA et al., 2018; DE SOUZA et al., 2022; REN et al., 2021).

A disposição de águas residuárias no solo, quando planejada considerando critérios agrônômicos e ambientais, pode trazer benefícios nutricionais para as plantas, reduzindo o uso de fertilizantes convencionais (ERTHAL et al., 2010). Entretanto, quando manejados de maneira inadequada, resíduos de criação animal em confinamento podem contaminar o meio ambiente e gerar risco à saúde pública (SILVA et al., 2012). Além disso, o preço dos fertilizantes convencionais no Brasil aumentou nos últimos anos devido à alta dependência de importação, câmbio desvalorizado e aumento nos fretes marítimos internacionais. No ano de 2021, o preço da ureia subiu 154% e o do cloreto de potássio, 192% (OLIVEIRA & CARVALHO, 2022). Fato esse que impulsiona a busca por alternativas mais baratas e ambientalmente corretas de fertilização do solo.

Os tratamentos mais comuns para águas residuárias provenientes da bovinocultura são: sistemas por lodo ativado, sistema de lagoas de estabilização, sistema por filtros biológicos e sistema anaeróbio (ex.: *Upflow anaerobic sludge blanket* - UASB, Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente - RAFA, Reator Anaeróbio de Leito Fluidificado - RALF e Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente através de Leito de Lodo - RAFAALL) (SOUZA; DUARTE, 2014). Em linhas gerais, esses tratamentos podem necessitar de gradeamento, desarenação, decantadores, filtros, adensadores, digestores e/ou sistemas de desidratação de lodo, energia elétrica, etc. Já a biorremediação de ARB com microalgas precisa essencialmente de CO₂ e luz solar. É evidente que para a otimização do processo, outros recursos podem ser necessários. Porém, é um processo simples se comparado aos métodos mais empregados atualmente.

As microalgas são biofixadoras de carbono atmosférico e a biomassa gerada durante a biorremediação da ARB pode ser utilizada como biofertilizante, biocombustível, ração, entre outros (DE MENDONÇA et al., 2018; DOS SANTOS et al., 2021; ALVAREZ et al., 2021). Uma grande vantagem desse sistema é que a biofixação de CO₂ acontece simultaneamente ao rápido crescimento e produção de biomassa das microalgas. Entretanto, é importante saber que a taxa de biofixação de CO₂ pode variar entre diferentes espécies, diferentes condições de crescimento ou até mesmo em cepas mutantes da mesma espécie (MOLAZADEH et al., 2019).

Neste contexto, para atender a demanda de 9,7 bilhões de pessoas, que é a população do planeta prevista em 2050 (UNITED NATIONS, 2019), é imprescindível a transição dos sistemas atuais de produção de alimentos para modelos de produção mais sustentáveis. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (ODS) e suas metas buscam estabelecer meios inclusivos, eficientes e transparentes para tornar realidade uma agenda mundial ambiciosa do desenvolvimento sustentável (social, econômico, ambiental) e que promova a paz, a justiça e instituições eficazes (UNRIC, 2018; BRASIL, 2017). Dos 17 objetivos, é possível destacar três que se relacionam intimamente com esta pesquisa. São eles: ODS 2 - Erradicar a fome, alcançar a segurança alimentar, melhorar a nutrição e promover a

agricultura sustentável; ODS 12 - Garantir padrões de consumo e de produção sustentáveis; e, ODS 13 - Adotar medidas urgentes para combater as alterações climáticas e os seus impactos. Dentro desses objetivos, a produção de biofertilizantes de biomassa de microalgas está ligada as metas que tratam de sistemas sustentáveis de produção de alimentos, gestão sustentável e uso eficiente dos recursos naturais, gestão de resíduos e redução de seus impactos negativos para a saúde humana e meio ambiente, mitigação de impactos no que diz respeito às alterações climáticas.

Entende-se que a utilização de águas residuárias de bovinocultura como meio de cultivo para produção de biofertilizante de biomassa de microalgas pode, além de reduzir gastos com fertilizantes convencionais, contribuir positivamente no contexto ambiental e social das atividades agropecuárias. O foco desse processo é a eliminação ou redução da poluição por emissão de compostos potencialmente poluidores no ambiente, em especial, o despejo de efluentes sem tratamento em cursos d'água. Assim, o objetivo desta etapa da pesquisa foi definido considerando que diversos nutrientes orgânicos e inorgânicos conhecidamente úteis para o cultivo de microalgas estão presentes na ARB; os elementos nitrogênio, potássio e fósforo são essenciais para as plantas e são encontrados na biomassa de microalgas produzidas em ARB; e, o sistema de cultivo de microalgas contempla a biofixação de CO₂. Portanto, a hipótese do trabalho é que a produção de biomassa de microalgas da espécie de *Arthrospira platensis* DHR 20 no processo de biorremediação da ARB possibilitará a produção de biofertilizante passível de ser utilizado na produção agrícola, além de promover a biofixação de CO₂.

2 OBJETIVO

Produzir, em ARB, biomassa de *Arthrospira platensis* DHR 20 (Spirulina) com características físicas, químicas e microbiológicas compatíveis para ser usada como biofertilizante líquido. Também, objetivou-se determinar a taxa de biofixação de CO₂ no processo de cultivo da microalga na ARB.

3 MATERIAIS E MÉTODO

3.1 Água Residuária de Bovinocultura

A água residuária, proveniente de um sistema de produção de bovinocultura de leite sob manejo orgânico foi coletada no Sistema Integrado de Produção Agroecológica (SIPA), conhecida como Fazendinha Agroecológica do km 47. A referida Fazendinha é uma parceria interinstitucional entre a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Colégio Técnico da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (CTUR), Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio de Janeiro (Pesagro) e Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Agrobiologia e Solos), localizadas no município de Seropédica/RJ, exceto a Embrapa Solos situada no município do RJ.

A bovinocultura do SIPA conta com 50 cabeças da raça Girolando Leiteiro. Os animais são alimentados à base de pasto orgânico de *Brachiaria* spp., sem a adubação mineral. Durante a seca, os animais recebem capim, cana e leguminosa, também oriunda da produção orgânica. A limpeza das instalações de produção é realizada somente com água, e a retirada do esterco do curral é feita por raspagem (MATOS, 2016). A água de lavagem do estábulo da bovinocultura de leite é captada por tubos que a conduzem por gravidade até a esterqueira onde ocorre a separação de sólidos grosseiros e flutuantes. A coleta da ARB foi realizada pelo bombeamento da água da esterqueira entre março e abril de 2022. O local de coleta apresenta as coordenadas UTM 23K 636096 7482924. O clima, de acordo com a classificação de Köppen,

é Aw (clima tropical com inverno seco) com precipitação média anual de 1213 mm e temperatura média anual de 24,5°C (JORGE et al. 2022a; ALVARES et al., 2013; PEEL et al., 2007).

3.2 Caracterização Física, Química e Microbiológica da Água Residuária de Bovinocultura

A caracterização da ARB foi obtida a partir das análises de Nitrogênio Kjeldahl Total (NTK = Amônia + Nitrogênio orgânico), Nitrogênio amoniacal, Nitrato, Potássio, Fósforo total, Sódio, Magnésio, Cálcio, Zinco, Cobre, Boro, Coliformes Termotolerantes (log) NMP/100 mL, *Salmonella* sp., Ovos viáveis de helmintos. As análises químicas e microbiológicas foram determinadas conforme APHA (2017). A DQO foi obtida pelo método colorimétrico do teste Spectro Kit DQO Efluentes da Alfacit (ALFAKIT, 2022). A demanda química de oxigênio (DQO) é um dos parâmetros utilizados para identificar a presença de matéria orgânica na água e indica o consumo ou demanda de oxigênio necessário para estabilizá-la por meio da oxidação química (PARRON; MUNIZ; PEREIRA, 2011).

A concentração de carbono na biomassa da microalga foi determinada pela correlação entre os métodos para determinação da carga orgânica de águas residuárias descrita por BOWER & CHANEY (1974) que descrevem a relação entre DQO e COT (Carbono Orgânico Total ou Carbono Oxidável Total), dada pela equação $COT = 0,25 DQO + 1,30$. O COT é considerado um indicador de qualidade da água, pois é uma medida direta da diversidade de compostos orgânicos em vários estados de oxidação em uma amostra (PARRON; MUNIZ; PEREIRA, 2011). Em geral, a relação C:N é determinada pela razão entre carbono total (CT) e nitrogênio total, porém considerou-se que para a ARB e biofertilizante que COT é igual ao CT. Logo, a relação C:N foi calculada com a divisão do teor de COT pelo valor de NTK. O pH e a condutividade elétrica (CE) foram determinados usando uma Sonda AKSO multiparamétrica. A RAS foi calculada de acordo com metodologia de MATOS & MATOS (2017).

As análises da caracterização físico-química foram realizadas no Laboratório de Monitoramento Ambiental II, no Departamento de Engenharia (DE) do Instituto de Tecnologia (IT) da UFRRJ e na Embrapa Solos.

3.3 Cultivo de Microalgas na Água Residuária de Bovinocultura de Leite sob manejo Orgânica

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Monitoramento Ambiental II, localizado no DE/IT/UFRRJ. Antes da etapa de tratamento da ARB foi realizado o pré-cultivo das microalgas em ARB para adaptação do inóculo ao meio de cultivo. O pré-cultivo foi realizado com iluminação feita com 4 lâmpadas de LED, com potência de 40 W cada, e agitação para mistura homogênea do meio e da microalga feita por um compressor de ar que injetava 4 L O₂ min⁻¹, ambos operando 24 h d⁻¹ (Figura 1).

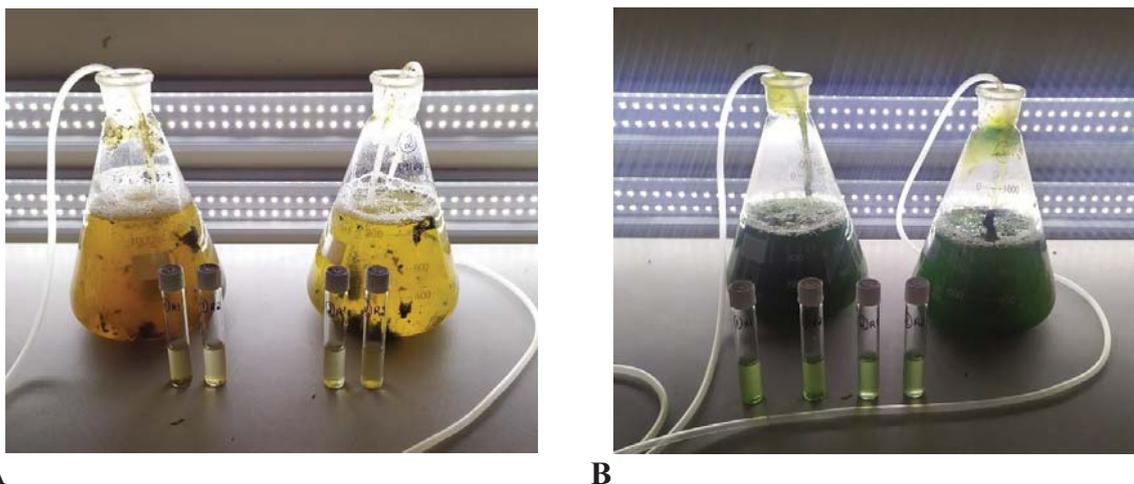


Figura 1. Pré-cultivo das microalgas em ARB (A) antes e (B) depois de 3 dias de cultivo.

Durante a biorremediação e o cultivo das microalgas foram utilizados 5 FBR, denominados R1, R2, R3, R4 e R5, com volume útil de 1,600 L. Desse volume, 1,350 L foram de ARB e 250 mL do inóculo. O tempo de detenção utilizado foi de 3 d. O inóculo com microalgas utilizado neste estudo foi cedido pelo Laboratório de Monitoramento Ambiental II – Solo e Resíduos Sólidos, localizado no DE/IT/UFRRJ. A cepa utilizada para crescimento na água residuária foi *Arthrospira platensis* DHR 20 (Spirulina).

Assim como no pré-cultivo, os cinco FBRs foram alimentados por uma bomba que injeta 4 L de oxigênio por minuto e a iluminação foi feita com 4 lâmpadas de LED, com potência de 40 W cada, ligados 24 h d⁻¹ (Figura 2A e Figura 2B). Foram realizadas 9 rodadas de experimento entre os meses de março e abril de 2022. A cada rodada, 1,350 L de biofertilizante era retirado do FBR, armazenado em outro recipiente plástico e congelado em freezer em temperatura de aproximadamente -18 °C. O congelamento teve o objetivo de retardar o processo de decomposição do biofertilizante orgânico, como usualmente realizado para armazenamento de alimentos (OPAS, 2019; ARTHUR et al., 2016). O volume de 250 mL restante no FBR era utilizado como inóculo da próxima rodada.

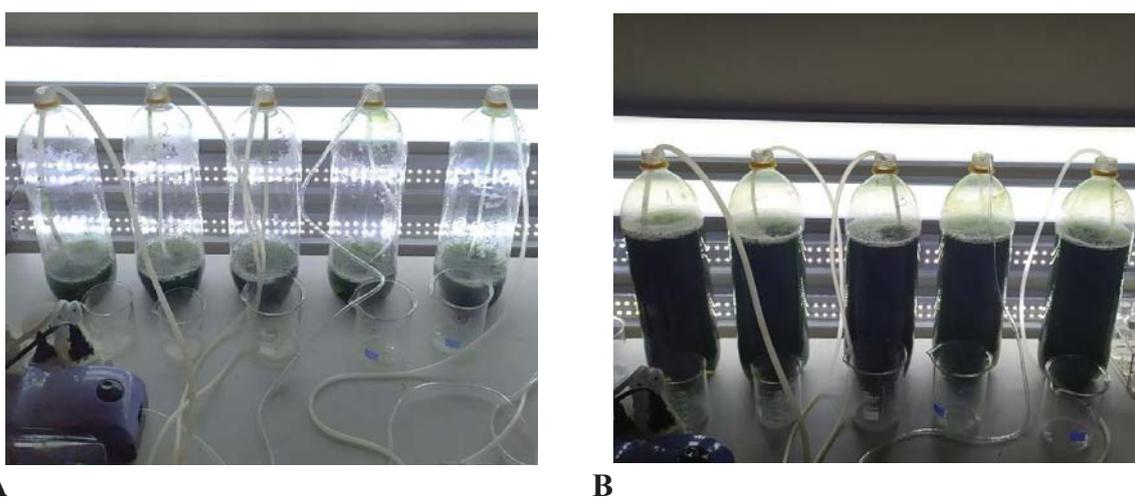


Figura 2. Biorremediação da ARB e cultivo das microalgas. A – Inóculo do pré-cultivo antes da adição de ARB; B – Início da biorremediação da ARB e cultivo das microalgas.

3.4 Avaliação da Produção de Biomassa de Microalga

3.4.1 Crescimento da biomassa

Os parâmetros de crescimento da biomassa mensurados foram: densidade óptica (DO), a biomassa seca e o pH. Para a análise da DO foram coletadas 2 mL de cada FBR. As amostras foram lidas quanto aos teores de DO no espectrofotômetro, da marca Hach, modelo DR 3900, as quais foram realizadas diariamente e em triplicata. A medição do pH e da temperatura foram realizadas com uma sonda AKSO multiparamétrica. A correlação linear entre biomassa seca (B) (g L^{-1}) e densidade óptica ($\text{DO}_{670\text{nm}}$) foi definida pela Equação 1.

$$B = (1,4932 * \text{DO}_{670\text{nm}}) + 3,8299 \quad (1)$$

A taxa específica de crescimento máxima ($\mu_{m\acute{a}x}$), em d^{-1} , foi verificada por meio da inclinação do gráfico da DO. O tempo de duplicação (Td), em d^{-1} , foi calculada por meio da Equação 2.

$$Td (d) = \frac{\ln(2)}{\mu_{m\acute{a}x}} \quad (2)$$

A produtividade volumétrica de biomassa (P) foi calculada pela subtração da biomassa seca final pela inicial, dividida pelo intervalo de tempo até o final do experimento, conforme a Equação 3.

$$P = \frac{X_f - X_i}{T_f - T_i} \quad (3)$$

Em que: P é a produtividade volumétrica de biomassa ($\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$); X_f é concentração final de biomassa (g L^{-1}); X_i é a concentração inicial de biomassa (g L^{-1}); e, $T_f - T_i$ é o intervalo de tempo até o fim do processo (d).

3.4.1.1 Processo de secagem da biomassa

Parte da biomassa de microalgas produzida foi separada da ARB tratada por meio da adição de oito gotas de cloreto férrico sob aeração seguida de 1 hora de repouso para decantação da biomassa. Após a etapa citada, a ARB tratada foi retirada do recipiente e a biomassa úmida foi levada ao congelador, em temperatura de aproximadamente $-18\text{ }^\circ\text{C}$. Depois de congelada, ela foi descongelada para retirada da água superficial com conta-gotas. O processo de congelamento e descongelamento aconteceu até a biomassa estar seca.

3.4.2 Biofixação de CO_2

A biofixação de CO_2 (R_{CO_2}) em $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ foi calculada a partir da relação entre a produtividade volumétrica de biomassa e da concentração de carbono presente na biomassa seca, por meio da Equação 4. A concentração de carbono na biomassa foi determinada por análise elementar (Elementar Vario EL III, German) (DE SOUZA et al., 2022). Esta taxa representa a biofixação do carbono assimilado pelo modo de nutrição fotoautotrófico e não contempla a fração assimilada a partir do carbono orgânico (DE MENDONÇA, 2017).

$$R_{\text{CO}_2} = P * C * (M_{\text{CO}_2} / M_c) \quad (4)$$

Em que: P é a produtividade volumétrica diária de biomassa ($\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$); C é a concentração de carbono na biomassa após o processo de secagem (g g^{-1}); M_{CO_2} é a massa molar do CO_2 (g mol^{-1}); M_c é a massa molar do carbono (g mol^{-1}).

3.5 Caracterização Física, Química e Microbiológica da Biomassa de Microalgas

O potencial de utilização das microalgas como biofertilizante foi definido a partir da caracterização da biomassa de microalgas. Os parâmetros e as metodologias utilizadas foram os mesmos descritos no item 3.2 para caracterização da ARB. As análises da caracterização física e química foram realizadas no Laboratório de Monitoramento Ambiental II, no Departamento de Engenharia (DE/IT/UFRRJ) e na Embrapa Solos.

3.6 Dose de Aplicação do Biofertilizante e da ARB como Fonte de N

A determinação da dose de aplicação (D_{AR}) de biofertilizante de microalgas e da ARB foi realizada em conformidade com o Método DEA/UFV (MATOS; MATOS, 2017) para aplicação equivalente à 120 kg N ha^{-1} em vasos de 0,8 L, sendo calculada por meio da Equação 5. A aplicação de 120 kg N ha^{-1} foi escolhida devido ao conhecido adequado desenvolvimento da rúcula com essa adubação nitrogenada (AGUIAR JUNIOR et al., 2010).

$$D_{AR} = \frac{1000 \times [N_{abs} - (T_{m1} \times MO \times \rho_S \times p \times 10^7 \times 0,05 \times \frac{n}{12})]}{[T_{m2} \times \frac{n}{12} \times N_{org} + (N_{amon} + N_{nittrato}) \times PR]} \quad (5)$$

Em que: D_{AR} - Dose de aplicação ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$); N_{abs} - Absorção de nitrogênio pela cultura para obtenção da produtividade desejada (kg ha^{-1}); T_{m1} - Taxa anual de mineralização da matéria orgânica anteriormente existente no solo ($0,01$ a $0,15 \text{ kg kg}^{-1} \text{ ano}^{-1}$); ρ_S - Massa específica do solo (t m^{-3}); p - Profundidade do solo (m) (considerada geralmente a camada orgânica se restringe aos primeiros 0,2 m de solo); n - Fração do ano relativa ao período de cultivo (ano); T_{m2} - Taxa de mineralização do nitrogênio orgânico ($\text{kg kg}^{-1} \text{ ano}^{-1}$); PR - Proporção na recuperação do nitrogênio mineral pela cultura (kg kg^{-1}).

3.7 Análise de Dados

Os dados foram tabulados e plotados em gráficos utilizando o software Microsoft Excel®, por meio do qual também foram calculadas as equações, apresentadas anteriormente, as médias e desvio padrão dos diferentes parâmetros avaliados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização Física, Química e Microbiológica da Água Residuária de Bovinocultura

A caracterização da água residuária utilizada como meio de cultivo é descrita na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros físico-químicos e microbiológicos da ARB

Parâmetro	ARB	DP*
Nitrogênio Kjeldahl Total	256,5 mg L^{-1}	$\pm 25 \text{ mg L}^{-1}$
Nitrogênio amoniacal	42,2 mg L^{-1}	$\pm 5,4 \text{ mg L}^{-1}$

Parâmetro	ARB	DP*
Nitrato	24,6 mg L ⁻¹	± 12,9 mg L ⁻¹
DQO	546,0 mg L ⁻¹	± 70,1 mg L ⁻¹
COT	153,8 mg L ⁻¹	± 22,6 mg L ⁻¹
C:N	0,6:1	-
Potássio	103,7 mg L ⁻¹	± 3,0 mg L ⁻¹
Fósforo total	25,0 mg L ⁻¹	± 1,2 mg L ⁻¹
Sódio	19,8 mg L ⁻¹	± 0,5 mg L ⁻¹
Magnésio	27 mg L ⁻¹	± 0,2 mg L ⁻¹
Cálcio	55 mg L ⁻¹	± 0,1 mg L ⁻¹
Zinco	0,35 mg L ⁻¹	± 0,01 mg L ⁻¹
Cobre	0,22 mg L ⁻¹	± 0,01 mg L ⁻¹
Boro	<0,001 mg L ⁻¹	± 0 mg L ⁻¹
pH	8	± 0,3
Condutividade elétrica	1444,4 µS cm ⁻¹	± 24,9 µS cm ⁻¹
Coliformes Termotolerantes (log) NMP/100mL	8 log NMP/100 mL	± 0,5 log NMP/100 mL
<i>Salmonella</i> sp.	Não detectado	-
Ovos viáveis de helmintos	Não detectado	-

*DP: Desvio padrão.

Um valor de DQO de 622,89 mg L⁻¹ foi observada em ARB após tratamento piloto com alagado construído na Fazendinha Agroecológica km 47 (JORGE et al., 2022a). No mesmo ponto onde a ARB desse estudo foi coletada, JORGE et al. (2022b) relataram DQO de 2058,9 mg L⁻¹, valor 3,8 vezes maior do que o identificado na presente pesquisa. Após tratamento primário com decantador e tratamento anaeróbico em reator UASB, DE SOUZA et al. (2022) obtiveram concentração de DQO de 1400 mg L⁻¹. Ou seja, comparativamente à estudos recentes, a ARB utilizada nessa pesquisa está com DQO abaixo do comum para o local de coleta.

O NTK, por sua vez, apresentou valor 2,7 vezes maior do que JORGE et al. (2022b) e 2,2 vezes menor do que DE SOUZA et al. (2022). A maior parte do N das ARB são provenientes da urina dos animais e, portanto, pode ter sido esse o fator que variou durante as coletas dos estudos. Por outro lado, o Mg está semelhante à análise de MARQUES et al. (2019), o K está somente 3,5 mg L⁻¹ abaixo do que encontrou JORGE et al. (2022a) e Na, Mg e Ca estão com valores próximos aos relatados por JORGE et al. (2022b).

A RAS é o parâmetro mais comumente utilizado para avaliar a classe de restrição ao teor de Na ou, com isso, da redução da infiltração da água e permeabilidade do solo (ONDRASEK; RENGEL, 2021; AYERS; WESTCOT, 1991). A incorporação de cátions de baixa valência no solo, como Na⁺ e K⁺, em relação aos de maior valência, como Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺, gera o afastamento e dispersão dos colóides do solo. A avaliação do risco de dispersão da argila do solo é determinada, entre outras formas, pelo valor da RAS (MATOS; MATOS, 2017). A RAS média da ARB foi de 0,33 (±0,03). Como a condutividade elétrica foi 1,44 dS m⁻¹, de acordo com AYERS; WESTCOT (1991), a ARB não apresenta grau de restrição para uso no solo, quanto a sodicidade (toxicidade do íon sódio). Contudo, quando se avalia o grau de restrição de uso referente a salinidade (disponibilidade de água para a cultura), a CE aqui indicada obteve grau de restrição ligeira a moderada. Com isso, a depender do uso continuado em uma área de produção e da sensibilidade da cultura produzida, os autores anteriormente citados recomendam que se avalie a necessidade de se aplicar uma lâmina de lixiviação, de modo a controlar a CE da água do solo em um valor abaixo do qual possibilita a produção

potencial da cultura. Salienta-se que no presente trabalho o período de trabalho foi considerado curto, diferente do que ocorreria em um cultivo tradicional. Estudo também com ARB coletada na Fazendinha Agroecológica km 47 identificou CE 709 $\mu\text{S cm}^{-1}$, aproximadamente metade do encontrado no presente estudo, e constatou que o seu uso para irrigação não apresentava risco ao solo e a planta quando à salinidade (MATOS, 2016).

Variações nos parâmetros físicos e químicos de sistemas biológicos são esperadas ocorrem naturalmente. Entretanto, configuram um desafio na padronização dos experimentos que almejam a produção de biofertilizantes, por exemplo. O ideal seria poder garantir uma matéria-prima com composição pouco variável, mesmo sendo um resíduo, para gerar um produto com certa previsibilidade de conteúdo.

4.2 Produção de Biomassa de Microalga

4.2.1 Crescimento da biomassa

Os valores médios de pH e temperatura encontrados ao longo do cultivo foram 8,9 e 29,5°C, respectivamente. A taxa específica de crescimento máxima ($\mu_{\text{máx}}$) foi de 0,16, verificada por meio da inclinação do gráfico da DO média dos cinco FBR (Figura 3). O tempo de duplicação (Td) foi de 4,4 d^{-1} . A produtividade volumétrica de biomassa (P) foi em média de 0,13 $\text{g L}^{-1}\text{d}^{-1}$.

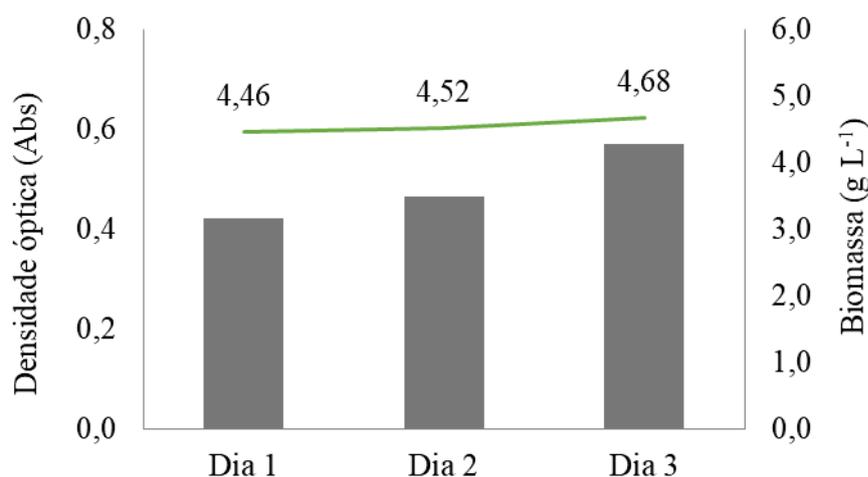


Figura 3. Densidade óptica e produção de biomassa de microalgas durante o cultivo.

Cultivando *Spirulina* sp. LEB 18 em meio Zarrouk sem fonte de carbono, DA ROSA et al. (2015) alcançaram em 8 ciclos valores médios de $\mu_{\text{máx}}$ de 0,24, Td de 2,97 d e produtividade volumétrica de biomassa entre 0,0263 e 0,0291 $\text{g L}^{-1}\text{d}^{-1}$. Com a mesma espécie e meio Zarrouk acrescido de glicerol em concentrações de 0, 0,01, 0,02, 0,03, 0,04 e 0,05 mol L^{-1} , DE MORAIS et al. (2019) obtiveram P variando de 0,17, 0,37, 0,51, 0,58, 0,75 a 0,72 $\text{g L}^{-1}\text{d}^{-1}$, respectivamente. Também com cepas de spirulina, com água residuária de bovinocultura leiteira tratada como meio de cultivo, HENA et al. (2017) atingiram P de 0,41 $\text{g L}^{-1}\text{d}^{-1}$ e, com meio composto com 0,5% de resíduo de peixe, SHANTHI, PREMALATHA E ANANTHARAMAN (2021) registraram P de 0,131 $\text{g L}^{-1}\text{d}^{-1}$.

4.2.2 Biofixação de CO₂

Por meio da Equação 4, com seus dados de entrada, foi calculada a biofixação média de CO₂ de 0,22 g L⁻¹ d⁻¹. A comparação com taxas de biofixação de CO₂ de outros estudos é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Comparação do percentual de carbono e da taxa da biofixação de CO₂ em estudos com microalgas

Espécie	Substrato	C (%)	R _{CO₂} (g L ⁻¹ d ⁻¹)	Referência
<i>Chlorella vulgaris</i> LEB-104	Meio Bristol Modificado	45	0,252	SYDNEY et al. (2010)
<i>Botryococcus braunii</i> SAG-30.81	Meio 3N-MBM	58	0,497	
<i>Spirulina platensis</i> LEB-52	Meio Zarrouk	50	0,319	
<i>Dunaliella tertiolecta</i> SAG- 13.86	Meio DUN	36	0,272	
<i>Scenedesmus obliquus</i> (ACOI 204/07)	ARB após digestão anaeróbia	43,5 (±0,03)	0,327	DE MENDONÇA (2017)
		- 43,9 (±0,01)	- 0,547	
<i>Arthrospira platensis</i> DHR 20	ARB após digestão anaeróbia	41,4 (±1,3)	0,829 (±0,007)	DE SOUZA et al. (2022)
		- 43,6 (±1,5)	- 1,051 (±0,013)	
<i>Arthrospira platensis</i> DHR 20	ARB de um sistema orgânico de produção	47,1 (±2)	0,22 (±0,01)	Presente estudo

Valores entre parênteses indicam o desvio padrão da média.

Em sistema de batelada, como este experimento, utilizando a espécie *Scenedesmus obliquus* (ACOI 204/07) em meio de cultivo composto de ARB após digestão anaeróbia, DE MENDONÇA (2017) alcançou teores de C entre 43,5% e 43,9%, com taxa de biofixação de 0,547 e 0,327 g L⁻¹ d⁻¹. DE SOUZA et al. (2022) alcançaram a biofixação à 1,051 g CO₂ L⁻¹ d⁻¹, valor 22% maior do que o obtido neste trabalho. Já o ensaio conduzido com quatro espécies diferentes, cada uma em um meio de cultivo diferente, não ultrapassou 0,497 g CO₂ L⁻¹ d⁻¹, 42% menor do que o valor encontrado na presente pesquisa (SYDNEY et al., 2010).

A biofixação de CO₂ é diretamente proporcional à produtividade volumétrica de biomassa e, portanto, será maior em experimentos com intenso crescimento de microalgas em menor tempo. Baixas concentrações de C nas células de *Arthrospira platensis* podem ser atribuídas ao fato dessa espécie ser uma eficiente acumuladora de proteína, especialmente quando cultivada em meios com altas concentrações de nitrogênio (DE SOUZA et al., 2022). Corroborando com essa informação, no experimento de DE SOUZA et al. (2022) com ARB 67,7% mais rica em nitrogênio total (1001 mg L⁻¹) do que a ARB desse estudo (323,3 mg L⁻¹)

as porcentagens de C das biomassas da mesma espécie de *Spirulina* foram de 7,4 a 12,1% menores.

A efetiva exploração das microalgas como biofixadoras de CO₂ em larga escala poderia retirar toneladas desse GEE da atmosfera. Considerando a produção de biomassa de 0,13 g L⁻¹ e a biofixação média de 0,22 g CO₂ L⁻¹ d⁻¹ é possível estimar que, em condições semelhantes as dessa pesquisa, a biorremediação do volume anual de águas residuárias de bovinocultura leiteira produzido no Brasil de aproximadamente 100,2 bilhões de litros (DE MENDONÇA et al., 2022; ROCHA; CARVALHO; RESENDE, 2020) permitiria a biofixação de 22.340 t CO₂ ano⁻¹ e produção de 12.903,8 t ano⁻¹ de biomassa de microalgas. A biomassa produzida poderia ser totalmente utilizada como biofertilizante, ou ainda, poderia ser insumo para a produção de biocombustível, por exemplo.

De acordo com o método de cálculo das Estimativas Anuais de Emissões de GEE no Brasil, a agropecuária emitiu 26.005.000 t CO₂ em 2020 (BRASIL, 2022). Tendo em vista os resultados do experimento dessa pesquisa, estima-se que a biorremediação com microalgas de toda ARB produzida anualmente no Brasil mitigaria 0,1% da emissão nacional de CO₂ proveniente das atividades agropecuárias em 2020. O uso da tecnologia utilizada nesse estudo pode ampliar a conscientização de pequenos produtores rurais e a capacidade institucional sobre medidas de mitigação de impactos relacionados às alterações climáticas, como a emissão de GEE, atendendo assim à uma meta do ODS 13 da ONU.

Além disso, a otimização dos métodos de cultivo de microalgas pode intensificar o desempenho da fixação de CO₂ (SONG et al., 2019). De acordo com BOSE et al. (2022), uma alta alcalinidade (pH>10) é necessária para garantir uma boa remoção de CO₂. A regulação da alcalinidade é essencial para evitar uma limitação severa de carbono inorgânico em consórcios de microalgas e bactérias durante a biorremediação de águas residuárias, uma vez que a baixa alcalinidade propicia a limitação do crescimento de microorganismos fotoautotróficos como as microalgas (CASAGLI et al., 2021; OVIEDO et al., 2022).

4.3 Caracterização Física, Química e Microbiológica do Biofertilizante (ARB + Biomassa de Microalgas)

A caracterização física e química da biomassa de microalgas está descrita na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros físicos, químicos e microbiológicos da biomassa de microalgas

Parâmetro	Biomassa de microalgas	DP	ARB	DP*	Comparativo ARB (%)
Nitrogênio Kjeldahl Total	83 mg L ⁻¹	± 2,2 mg L ⁻¹	256,5 mg L ⁻¹	±25 mg L ⁻¹	- 67,6
Nitrogênio amoniacal	43,1 mg L ⁻¹	± 2,5 mg L ⁻¹	42,2 mg L ⁻¹	± 5,4 mg L ⁻¹	+ 2,1
Nitrato	104,5 mg L ⁻¹	± 29,5 mg L ⁻¹	24,6 mg L ⁻¹	± 12,9 mg L ⁻¹	+ 324,8
DQO	889,0 mg L ⁻¹	± 128,0 mg L ⁻¹	546,0 mg L ⁻¹	± 70,1 mg L ⁻¹	+ 62,8
COT	223,6 mg L ⁻¹	± 35,4 mg L ⁻¹	153,8 mg L ⁻¹	± 22,6 mg L ⁻¹	+ 45,4
C:N	2,7:1	-	0,6:1	-	+ 350,0
Potássio	92,9 mg L ⁻¹	± 1,2 mg L ⁻¹	103,7 mg L ⁻¹	± 3,0 mg L ⁻¹	- 10,4
Fósforo total	25,2 mg L ⁻¹	± 0,7 mg L ⁻¹	25,0 mg L ⁻¹	± 1,2 mg L ⁻¹	+ 0,8
Sódio	22 mg L ⁻¹	± 0,6 mg L ⁻¹	19,8 mg L ⁻¹	± 0,5 mg L ⁻¹	+ 11,1
Magnésio	21 mg L ⁻¹	± 1,1 mg L ⁻¹	27 mg L ⁻¹	± 0,2 mg L ⁻¹	- 22,2
Cálcio	49 mg L ⁻¹	± 0,2 mg L ⁻¹	55 mg L ⁻¹	± 0,1 mg L ⁻¹	- 10,9
Zinco	0,32 mg L ⁻¹	± 0,01 mg L ⁻¹	0,35 mg L ⁻¹	± 0,01 mg L ⁻¹	- 8,6
Cobre	0,2 mg L ⁻¹	± 0,01 mg L ⁻¹	0,22 mg L ⁻¹	± 0,01 mg L ⁻¹	- 9,1
Boro	<0,001 mg L ⁻¹	± 0 mg L ⁻¹	<0,001 mg L ⁻¹	± 0 mg L ⁻¹	=
pH	9	± 0,6	8	± 0,3	+ 12,5
Condutividade elétrica	1351,2 µS cm ⁻¹	± 62,7 µS cm ⁻¹	1444,4 µS cm ⁻¹	± 24,9 µS cm ⁻¹	- 6,5
Coliformes Termotolerantes (log) NMP/100mL	2 log NMP/100 mL	± 0,2 log NMP/100 mL	8 log NMP/100 mL	± 0,5 log NMP/100 mL	- 75
Salmonella sp.	Não detectado	-	Não detectado	-	=
Ovos viáveis de helmintos	Não realizado	-	Não detectado	-	=

*DP: Desvio padrão.

A biorremediação com microalgas resultou em diversas mudanças nas características físicas, químicas e microbiológicas da ARB, gerando assim, o biofertilizante composto da biomassa de microalgas e ARB tratada (Figura 4A e Figura 4B). Essa mudança é esperada após o tratamento, contudo, diferente de SOUZA et al. (2022), GRAMEGNA et al. (2020) e LIU et al. (2016), alguns parâmetros aumentaram sua concentração ao invés de diminuir. Somente Boro, *Salmonella* sp. e Ovos viáveis de helmintos permaneceram com valores semelhantes ao inicial.

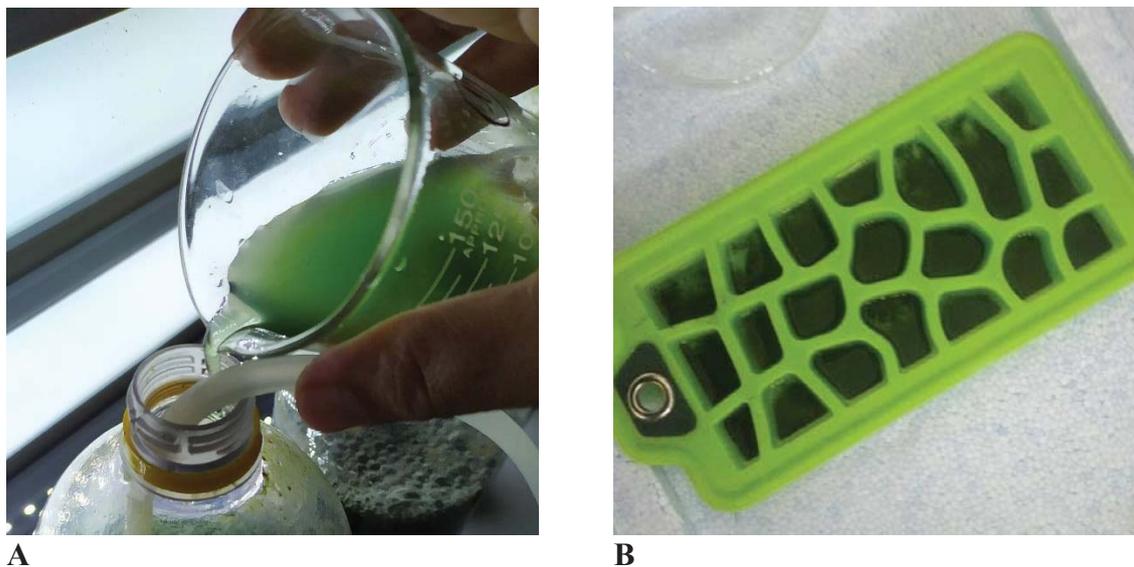


Figura 4. Componentes do biofertilizante produzido após biorremediação de ARB com microalgas. A – ARB tratada com biomassa de microalgas; B – Biomassa de microalgas.

Antes do tratamento, o parâmetro com maior concentração era DQO. Após o tratamento, a DQO aumentou em 62,8%, mantendo-se como o parâmetro com maior concentração. O aumento da DQO ocorreu, provavelmente, pela biofixação de CO_2 atmosférico como carbono nas estruturas celulares das microalgas (BORGES-CAMPOS et al., 2010). A oxidação da matéria orgânica por meio da análise de DQO difere qualitativamente e quantitativamente da análise de DBO, contudo, se a amostra analisada contém compostos que são oxidados química e biologicamente, a DQO pode substituir a DBO. O COT, calculado a partir da DQO, aumentou 45,4%.

A relação C:N mais que dobrou na biomassa de microalgas, mas ainda assim é baixa se comparada ao sorgo (C:N 41), feijão-de-porco (C:N 12) e milho (C:N 33), por exemplo (SOUZA et al., 2015). A velocidade com que ocorre a mineralização de materiais orgânicos depende de fatores como condições ambientais e a relação C:N, que por sua vez, influenciam a atividade dos microrganismos decompositores (MATOS; MATOS, 2017). Uma relação C:N mais baixa pode contribuir para uma mineralização e liberação mais rápida de N (ROP et al., 2018). Segundo LORENTZ et al. (2020) quanto menor a relação C:N, mais fácil a decomposição da matéria orgânica, e uma relação equilibrada entre C e N pode favorecer a mineralização dos nutrientes, tornando-os disponíveis para o sistema solo/planta. Assim, é provável que a decomposição do sorgo seja mais lenta do que a decomposição do feijão-de-porco, que é mais lenta do que a decomposição do biofertilizante produzido nessa pesquisa, que é mais lenta do que a decomposição da ARB. Logo, conclui-se que o tempo de decomposição do biofertilizante ficou aproximadamente 350% maior do que o da ARB.

O maior incremento aconteceu no nitrato que aumentou 324,8%. A produção de oxigênio durante a fotossíntese pode permitir o desenvolvimento de bactérias nitrificantes que transformam o nitrogênio contido no meio (amônio para nitrito e nitrito para nitrato), não

necessariamente os removendo (DE MENDONÇA et al., 2021). O nitrato é uma das formas de nitrogênio assimiláveis pelas plantas, portanto esse aumento é um aspecto positivo para aplicação agrícola desse bioproduto. Entretanto, se disposto inadequadamente em solos e corpos d'água, pode ocasionar impactos ambientais e sociais. A contaminação por nitrato ocasiona a grave doença metahemoglobinemia (Síndrome do Bebê Azul) (MATOS; MATOS, 2017). Portanto, é indispensável que o uso do biofertilizante de microalgas com tais características seja utilizado de maneira responsável e segura ao meio ambiente e aos seres humanos. O nitrogênio amoniacal teve uma “singela” alta de 2,1% enquanto NTK, diferentemente de nitrato e nitrogênio amoniacal, reduziu em 67,6%. De acordo com DE MENDONÇA et al. (2021), a remoção de nitrogênio em um sistema de tratamento de águas residuárias com microalgas é diretamente dependente do metabolismo do organismo. Certamente, parte do NTK foi convertido à nitrato durante o cultivo das microalgas por nitrificação.

Os teores de potássio, magnésio, cálcio, zinco e cobre tiveram eficiência de remoção de 10,4%, 22,2%, 10,9%, 8,6% e 9,1%, respectivamente. Apesar da redução na concentração de K em comparação com a ARB, o biofertilizante produzido ainda contém 92,9 mg L⁻¹ desse cátion, demonstrando o potencial para uso como fornecedor desse nutriente às culturas agrícolas. Fósforo total ficou com valor semelhante ao inicial, com ligeira alta em 0,8%. A condutividade elétrica foi reduzida em 6,5%. Já o pH subiu de 8 para 9. LIU et al. (2016) também notaram aumento de pH após tratamento de ARB diluída com as microalgas *Diplosphaera* sp. MM1. Durante o tempo de cultivo, é comum observar um aumento no pH, devido a absorção de CO₂ (GONÇALVES et al., 2017; KUMAR et al. 2010). O aumento do pH é esperado no processo fotossintético de cultivo de microalgas (DE MENDONÇA et al., 2021). Coliformes termotolerantes foram reduzidos em 75%, o que é uma ótima informação quando se pretende utilizar esse material para fertirrigação de culturas consumidas cruas, tendo em vista que alimentos “in natura” podem apresentar até 10² de *Escherichia coli*/g (coliforme termotolerante) para serem consideradas como "qualidade aceitável", conforme IN N°60/2019. Segundo KUMAR et al. (2010), o aumento do pH do meio durante o cultivo de microalgas é benéfico para a inativação de patógenos no tratamento de águas residuárias.

O tempo de operação do tratamento pode ter influenciado a eficiência de remoção da biorremediação conduzida nesse estudo. Estudos com altas porcentagens de remoção de DQO, NH₄⁺ e P tiveram tempo de retenção de 6 (DE SOUZA et al., 2022), 7 (KUMAR et al., 2019), 10 (GRAGMEGNA et al., 2020) e até 19 dias (FERREIRA et al., 2021), enquanto esse estudo teve tempo de operação de 3 dias. A RAS média do biofertilizante de microalgas foi de 0,36 (±0,09). Como a condutividade elétrica foi 1,35 dS m⁻¹, de acordo com AYERS; WESTCOT (1991), o biofertilizante de microalgas produzido não apresenta nenhum grau de restrição para uso no solo em termos de sodicidade, mas devendo ter atenção quanto a salinidade, conforme indicado no item 4.1

Um modelo de bioeconomia circular baseado em microalgas pode ajudar a atingir quatro importantes ODS: ODS 6 (Água limpa e saneamento), ODS 7 (Energia barata e limpa), ODS 12 e ODS 13 (JAIN; MISHRA; MOHANTY, 2022). Os sistemas sustentáveis de produção de alimentos, práticas agrícolas resilientes que ajudem a manter os ecossistemas e que melhorem a qualidade do solo também são temas relacionados ao cultivo de microalgas para uso como biofertilizantes e constam como meta no ODS 2. Ainda, dentro do escopo do ODS 12, a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais, bem como, a redução da geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reutilização são tópicos que permeiam a discussão acerca da implementação de biorrefinarias de microalgas (UNRIC, 2018; DAGNAISSER et al., 2022).

O funcionamento de biorrefinarias é imprescindível para o desenvolvimento de bioprodutos sustentáveis e economicamente competitivos a base de microalgas (RUSSELL et

al., 2022). Tal abordagem pode proporcionar a mitigação dos impactos ambientais; corte de custos em propriedades agrícolas, com a redução do uso de tratamentos convencionais para águas residuárias; produção e comercialização de bioprodutos, tornando-se fonte de renda para os produtores rurais (DAGNAISSER et al., 2022).

4.4 Dose de Aplicação do Biofertilizante e da ARB como Fonte de N

A partir da Equação 5, com seus dados de entrada, foram calculadas as doses de aplicação em relação à ARB e biomassa de microalgas de 1.756,32 m³ ha⁻¹ e 1.063,61 m³ ha⁻¹, respectivamente. Em vasos de 0,8 L e 81 cm², as aplicações seriam de 1.423 mL de ARB e 862 mL de biofertilizante de microalgas.

$$D_{AR} = \frac{1000 \times [120 - (0,07 \times 0,0054 \times 1,49 \times 0,14 \times 10^7 \times 0,05 \times \frac{2}{12})]}{[0,5 \times \frac{2}{12} \times 214 + (42 + 25) \times 0,7]}$$

$$D_{AR} = 1756,32 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} = 1423 \text{ mL de ARB}$$

$$D_{AR} = \frac{1000 \times [120 - (0,07 \times 0,0054 \times 1,49 \times 0,14 \times 10^7 \times 0,05 \times \frac{2}{12})]}{[0,5 \times \frac{2}{12} \times 40 + (43 + 105) \times 0,7]}$$

$$D_{AR} = 1063,61 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} = 862 \text{ mL de biofertilizante de microalgas}$$

O valor de T_{m1} adotado foi 0,07 kg/kg/ano, o valor de T_{m2} adotado para ARB e biofertilizante foi de 0,5 kg/kg/ano e o valor de PR adotado foi 0,7 kg/kg (MATOS; MATOS, 2017). Com isso, verificou-se que o volume demandado de biomassa de microalgas foi 39,4% menor de líquido do que ARB somente, atendendo à mesma concentração de N.

5 CONCLUSÃO

A biomassa de microalgas da espécie *Arthrospira platensis* DHR 20, produzida a partir da biorremediação da ARB, possui características físicas, químicas e microbiológicas para uso como biofertilizante, principalmente, de nitrogênio e potássio. De acordo com a RAS, o biofertilizante de microalgas e a ARB não apresentam nenhum grau de restrição para uso no solo quanto a sodicidade e grau de restrição de uso ligeira a moderada quanto a salinidade.

A taxa de biofixação média de 0,22 g CO₂ L⁻¹ d⁻¹ obtida pela pesquisa permite concluir que o cultivo da microalga *Arthrospira platensis* DHR 20 em ARB apresenta aptidão para a biocaptura desse GEE.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR JUNIOR, R.A.; GUISTEM, J.M.; SILVA, A.G.P.; FIGUEIREDO, R.T.; CHAVES, A.M.S.; PAIVA, J.B.P.; SANTOS, F.N. Avaliação de alguns parâmetros de crescimento em rúcula. Horticultura Brasileira, v. 28, n. 2, S3970-S3974, 2010.

ALFAKIT. Início – Produtos – Kits – Kits individuais - Parte 1 – DQO – Spectro Kit DQO Efluentes. Disponível: <<https://alfakit.com.br/produtos/spectro-kit-dqo-efluentes-cod-949/>>. Acesso: 30 set. 2022.

ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., DE MORAES GONÇALVES, J. L., & SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728, 2013. doi:10.1127/0941-2948/2013/0507.

ALVAREZ, A. L.; WEYERS, S. L.; GOEMANN, H. M.; PEYTON, B. M.; GARDNER, R. D. Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture. *Algal Research*, 54(102200), 2021, ISSN 2211-9264, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102200>.

APHA. American Public Health Association. Standard methods for examination of water and wastewater, 23rd edn. APHA, AWWA, WPCF, Washington, 2017.

ARTHUR, VALTER; PEDROSO, BIANCA M.; ARTHUR, PAULA B.; HARDER, MARCIA N.C.; FRANCO, SUELY S.H.; FRANCO, CAMILO F. de O.; CAZE FILHO, JORGE. Irradiação de mandioca minimamente processada. *Tecnologia & Ciência Agropecuária*, João Pessoa, 10(1), p. 62-67, 2016.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W.; tradução de H.R. Gheyi, J.F. de Medeiros, F.A.V. Damasceno. A qualidade da água na agricultura. Campina Grande: UFPb, 1991. 218p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29 Revisado 1).

BORGES-CAMPOS, V; BARBARINO, E.; LOURENÇO, S.O. Crescimento e composição química de dez espécies de microalgas marinhas em cultivos estanques. *Ciência Rural*, Santa Maria, 40(2), p.339-347, 2010. ISSN 0103-8478.

BOUWER, H.; CHANEY, R.L. Land treatment of wastewater. U.S. Department of Agriculture, 133-169, 1974.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF (18 mar. 2005).

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA 430, de 13 de maio de 2011. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF (16 mai. 2011).

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil. Brasília – DF, 6ªed., 2022. 137p.

BRASIL. Ministério da Saúde (MS). Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Instrução Normativa N° 60, de 23 de dezembro de 2019. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF (26 dez. 2019).

BRASIL. Relatório Nacional Voluntário Sobre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Presidência da República do Brasil. Brasil, 2017. 41p.

BOSE, A., O'SHEA, R., LIN, R., MURPHY, J.D. Optimisation and performance prediction of photosynthetic biogas upgrading using a bubble column, *Chemical Engineering Journal*, Volume 437, Part 1, 2022, 134988, ISSN 1385-8947, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.134988>.

CASAGLI, F., ROSSI, S., STEYER, J.P., BERNARD, O., FICARA, E. Balancing microalgae and nitrifiers for wastewater treatment: can inorganic carbon limitation cause an environmental threat? *Environ. Sci. Technol.* 55, 3940–3955, 2021, <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05264>.

DAGNAISSER, L.S.; DOS SANTOS, M.G.B.; RITA, A.V.S.; CHAVES CARDOSO, J.; CARVALHO, D.F.; MENDONÇA, H.V. Microalgae as Bio-fertilizer: a New Strategy for Advancing Modern Agriculture, Wastewater Bioremediation, and Atmospheric Carbon

Mitigation. *Water Air Soil Pollut* 233, 477, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05917-x>.

DA ROSA, G.M.; MORAES, L.; CARDIAS, B.B.; DE SOUZA, M.R.A.Z.; COSTA, J.A.V. Chemical absorption and CO₂ biofixation via the cultivation of *Spirulina* in semicontinuous mode with nutrient recycle, *Bioresource Technology*, Volume 192, 2015, Pages 321-327, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.020>.

DE MENDONÇA, H.V. Tratamento e valorização de efluentes de bovinocultura por processos biológicos. Programa De Pós-Graduação em Ecologia Aplicada ao Manejo e Conservação de Recursos Naturais – Tese (Doutorado). 2017. 126p.

DE MENDONÇA, H.V.; OMETTO, J.P.H.B.; OTENIO, M.H.; MARQUES, I.P.R.; REIS, A.J.D.R. Microalgae-mediated bioremediation and valorization of cattle wastewater previously digested in a hybrid anaerobic reactor using a photobioreactor: Comparison between batch and continuous operation, *Science of The Total Environment*, Volume 633, 2018, Pages 1-11, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.157>.

DE MENDONÇA, H.V.; ASSEMAN, P.; ABREU, M.; COUTO, E.; MACIEL, A.M.; DUARTE, R.L.; SANTOS, M.G.B.; REIS, A. Microalgae in a global world: New solutions for old problems?, *Renewable Energy*, Volume 165, Part 1, 2021, Pages 842-862, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.014>.

DE MORAIS, M. G.; DE MORAIS, E. G.; DUARTE, J. H.; DEAMICI, K. M.; MITCHELL, B. G.; COSTA JAB. Biological CO₂ mitigation by microalgae: technological trends, future prospects and challenges. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 35, 78, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11274-019-2650-9>.

DE SOUZA, D. S.; VALADÃO, R. C.; DE SOUZA, E. R. P.; BARBOSA, M. I. M. J; DE MENDONÇA H.V. Enhanced *Arthrospira platensis* Biomass Production Combined with Anaerobic Cattle Wastewater Bioremediation. *Bioenergy Research*, 15, 412–425, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10258-4>.

DOS SANTOS, M.G.B.; DUARTE, R.L.; MACIEL, A.M.; ABREU, M.; REIS, A.; DE MENDONÇA, H.V. Microalgae Biomass production for biofuels in Brazilian scenario: A Critical Review. *Bioenerg. Res.* 14, 23–42, 2021, <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10180-1>.

MARTINS, P.C. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Gado de Leite. Anuário Leite 2022: pecuária leiteira de precisão. Leite: 12 tendências para esta década. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2022. 114p.

ERTHAL, V.J.T.; FERREIRA, P.A.; MATOS, A.T.; PEREIRA, O.G. Alterações físicas e químicas de um argissolo pela aplicação de água residuária de bovinocultura. *Revista de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n.5, p.467-477, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000500003>.

FERREIRA, A.; MELKONYAN, L.; CARAPINHA, S.; RIBEIRO, B.; FIGUEIREDO, D.; AVETISOVA, G.; GOUVEIA, L. Biostimulant and biopesticide potential of microalgae growing in piggery wastewater, *Environmental Advances*, Volume 4, 2021, 100062, ISSN 2666-7657, <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100062>.

GONÇALVES, A.L.; PIRES, J.C.M.; SIMÕES, M. A review on the use of microalgal consortia for wastewater treatment, *Algal Research*, Volume 24, Part B, 2017, Pages 403-415, ISSN 2211-9264, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.11.008>.

GRAMEGNA, G.; SCORTICA, A.; SCAFATI, V.; FERELLA, F.; GURRIERI, L.; GIOVANNONI, M.; BASSID, R.; SPARLAC, F.; MATTEI, B.; BENEDETTI, M. Exploring the potential of microalgae in the recycling of dairy wastes. *Bioresource Technology Reports*, 12(100604), 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100604>.

HENA, S., ZNAD, H., HEONG, K.T., & JUDD, S. Dairy farm wastewater treatment and lipid accumulation by *Arthrospira platensis*. *Water Research*, 128, 267–277, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.10.057>.

JORGE, M. F.; SILVA, L. D. B. da; HÜTHER, C. M.; CECCHIN, D.; MELO, A. C. F. de; FRANCISCO, J. P.; NASCENTES, A. L.; ALVES, D. G.; GUERRA, J. G. M. Potential use of treated wastewater from a cattle operation in the fertigation of organic carrots. *Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)*, Rio de Janeiro, v. 57, n. 4, p. 542–554, 2022a. DOI: 10.5327/Z2176-94781385.

JORGE, M.F.; DA SILVA, L.D.B.; SILVA, J.B.G. et al. Biological pilot treatment reduces physicochemical and microbiological parameters of dairy cattle wastewater. *Environ Sci Pollut Res*, 2022b. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24681-3>.

JAIN, R.; MISHRA, S.; MOHANTY, K. Cattle wastewater as a low-cost supplement augmenting microalgal biomass under batch and fed-batch conditions, *Journal of Environmental Management*, Volume 304, 2022, 114213, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114213>.

KUMAR, A.; ERGAS, S.; YUAN, X.; SAHU, A.; ZHANG, Q.; DEWULF, J.; MALCATA, F.X.; LANGENHOVE, H.V. Enhanced CO₂ fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future directions, *Trends in Biotechnology*, Volume 28, Issue 7, 2010, Pages 371-380, ISSN 0167-7799, <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2010.04.004>.

KUMAR, A. K.; SHARMA, S.; SHAH, E.; PARIKH, B. S.; PATEL, A.; DIXIT, G.; GUPTA, S.; DIVECHA JM. Cultivation of *Ascochloris* sp ADW007-enriched microalga in raw dairy wastewater for enhanced biomass and lipid productivity. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 943–954, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1712-0>.

LIU, C.; SUBASHCHANDRABOSE, S.; MING, H.; XIAO, B.; NAIDU, R.; MEGHARAJ, M. Phycoremediation of dairy and winery wastewater using *Diplosphaera* sp MM1. *Journal of Applied Phycology*, 28(6), 3331–3341, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0894-4>.

LORENTZ, J. F., CALIJURI, M. L., ASSEMANY, P. P., ALVES, W. S.; PEREIRA, O. G. Microalgal biomass as a biofertilizer for pasture cultivation: Plant productivity and chemical composition. *Journal of Cleaner Production*, 276, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124130>.

MARQUES, A. S.; PINHEIRO, E. F. M.; OLIVEIRA, A. P. S.; CAMPOS, D. V. B.; OLIVEIRA, R. S.; SILVA, R. M; MATOS, C. F. Tratamento da Água Residuária da Bovinocultura Utilizando Resíduos Agroflorestais: Retenção de Poluentes Ambientais. *Rev. Virtual Quim.*, 2020, 12 (2), 335-344. ISSN 1984-6835. <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20200026>.

MATOS, A.T.; MATOS, M.P. Disposição de águas residuárias no solo e em sistemas alagados construídos. Viçosa, MG: Ed. UFJ, 2017. 371p.

MATOS, C.F. Produção de biogás e biofertilizante a partir de dejetos de bovinos, sob sistema orgânico e convencional de produção. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, 2016. 52 f.

- MOLAZADEH, M., AHMADZADEH, H., POURIANFAR, H. R., LYON, S., & RAMPELOTTO, P. H. The Use of Microalgae for Coupling Wastewater Treatment with CO₂ Biofixation. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7, 2019. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00042>.
- OLIVEIRA, L.A.A.; CARVALHO, G.R. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Gado de Leite. Anuário Leite 2022: pecuária leiteira de precisão. Preços de insumos na atividade leiteira: tendência é de alta. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2022. 114p.
- ONDRASEK, G.; RENGEL, Z. Environmental salinization processes: Detection, implications & solutions, *Science of The Total Environment*, Volume 754, 2021, 142432, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142432>.
- OPAS. Organização Pan-Americana da Saúde. Tecnologias de conservação aplicadas à segurança de alimentos. Washington, D.C.: OPAS; 2019. ISBN: 978-92-75-72103-2; eISBN: 978-92-75-72104-9.
- OVIEDO, J.A, MUÑOZ, R., DONOSO-BRAVO, A., BERNARD, O., CASAGLI, F., JEISON, D. A half-century of research on microalgae-bacteria for wastewater treatment, *Algal Research*, Volume 67, 2022, 102828, ISSN 2211-9264, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102828>.
- PARRON, L.M; MUNIZ, D.H.F.; PEREIRA, C.M. Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química de água [recurso eletrônico] - Dados eletrônicos. - Colombo: Embrapa Florestas, 2011. (Documentos / Embrapa Florestas, ISSN 1980-3958; 219).
- PEEL, M.C.; FINLAYSON, B.L.; MCMAHON, T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, v.11, (5), 1633-1644, 2007. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- REN, Q.; CHEN, X.; YUMMINAGA, Y.; WANG, N.; YAN, W.; LI, Y.; LIU, L.; SHI, J. Effect of operating conditions on the performance of multichannel ceramic ultrafiltration membranes for cattle wastewater treatment, *Journal of Water Process Engineering*, Volume 41, 2021, 102102, ISSN 2214-7144, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102102>.
- ROCHA, D.T.; CARVALHO, G.R.; RESENDE, J.C. Cadeia produtiva do leite no Brasil: produção primária. Embrapa Gado de Leite, *Circ. Técn.* 123, ISSN 1678-037X, 2020. 16p.
- ROP, K.; KARUKU, G.N.; MBUI, D.; MICHIRA, I.; NJOMO, N. Formulation of slow release NPK fertilizer (cellulose-graft-poly(acrylamide)/nano-hydroxyapatite/soluble fertilizer) composite and evaluating its N mineralization potential. *Ann. Agric. Sci.* 63, 163-172, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2018.11.001>.
- RUSSELL, C., RODRIGUEZ, C., & YASEEN, M. High-value biochemical products & applications of freshwater eukaryotic microalgae, *Science of The Total Environment*, Volume 809, 2022. ISSN 151111, 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151111>.
- SHANTHI, G.; PREMALATHA, M.; ANANTHARAMAN, N. Potential utilization of fish waste for the sustainable production of microalgae rich in renewable protein and phycocyanin-*Arthrospira platensis*/Spirulina, *Journal of Cleaner Production*, Volume 294, 2021, 126106, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126106>.
- SILVA, W. T. L.; NOVAES, A. P.; KUROKI, V.; MARTELLI, L. F. A.; MAGNONI JÚNIOR, L. Avaliação físico-química de efluente gerado em biodigestor anaeróbico para fins de avaliação de eficiência e aplicação como fertilizante agrícola. *Química Nova*, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 35-40, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000100007>.

SONG, C., LIU, Q., QI, Y., CHEN, G., SONG, Y., KANSHA, Y., KITAMURA, Y. Absorption-microalgae hybrid CO₂ capture and biotransformation strategy—A review, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Volume 88, 2019, Pages 109-117, ISSN 1750-5836, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.06.002>.

SOUZA, R.J.C. de; FERREIRA NETO, R.A.; SILVA, A.A. da; BARROS, B.G. de F.; GIONGO, V.; FREITAS, A.D.S. de. Produção de biomassa e relação C/N em plantas utilizadas como adubos verdes no município de Juazeiro- BA. XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Centro de Convenções – Natal/RN. Embrapa Semiárido. 2015. 4p.

SOUZA, W.J; DUARTE, S.N. Água residuária: tratamentos e aplicações em áreas agrícolas. Picaricaba: FEALQ, 2014. 197p.:il.

SYDNEY, E.B., STURM, W., DE CARVALHO, J. C., THOMAZ-SOCCOL, V., AND LARROCHE, C., PANDEY, A., SOCCOL, C.R. Potential carbon dioxide fixation by industrially important microalgae. *Bioresource Technology* Volume 101, Issue 15, 2010, Pages 5892-5896, ISSN 0960-8524, <https://doi:10.1016/j.biortech.2010.02.088>.

UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). *World Population Prospects 2019: Highlights (ST/ESA/SER.A/423)*. 40p.

UNRIC. Centro de Informação Regional das Nações Unidas para a Europa Ocidental. *Guia sobre Desenvolvimento Sustentável. 17 Objetivos Para Transformar O Nosso Mundo*. 2018. 38p.

CAPÍTULO II. Uso da biomassa de microalgas na produção de rúcula

RESUMO

Alcançar a segurança alimentar para a crescente população mundial simultaneamente ao avanço de uma agricultura moderna mais sustentável e o manejo adequado de fertilizantes convencionais é um dos principais desafios da atualidade. Considerando o potencial do biofertilizante de microalgas para uso em cultivos orgânicos de hortaliças, o objetivo foi avaliar comparativamente o efeito do biofertilizante de biomassa de microalgas, oriundo da produção de microalgas em ARB, com a aplicação de ARB e com o uso de fonte convencional de nitrogênio (ureia) no desenvolvimento da parte aérea e das raízes da rúcula. Também, objetivou-se verificar as características microbiológicas nas folhas das rúculas ao final do cultivo, bem como, avaliar as alterações nas propriedades químicas do solo e na estrutura do solo após o experimento. O experimento foi composto por três tratamentos: T1 – Controle, com aplicação de ureia; T2 –ARB; T3 – Biofertilizante de biomassa de microalgas. Os parâmetros morfológicos das plantas analisados foram: altura (H); diâmetro do caule (DC); massa fresca da parte aérea (MFPA); massa seca da parte aérea (MSPA); massa fresca de raízes (MFR); massa seca de raízes (MSR); número de folhas (NF); Comprimento das raízes (CR); área foliar (AF) e; Índice de Qualidade de Dickson (IQD). O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com sete repetições com quatro plantas cada, totalizando 28 plantas por tratamento. Com os resultados foi possível concluir que o biofertilizante de microalgas pode ser utilizado como fonte de nitrogênio no cultivo de rúcula em substituição a ureia, com qualidade de desenvolvimento das plantas similar segundo o IQD, porém com menor produtividade em termos de H, NF, DC, AF e MSPA. O biofertilizante de biomassa de microalgas proporcionou alguns parâmetros morfológicos (H, NF, DC, AF, CR, MSPA, MFR, IQD) e químicos (K e Na nas folhas) estatisticamente semelhantes aos das plantas fertilizadas com ARB. Não foram constatadas diferenças estatísticas entre os três tratamentos para os parâmetros CR, MFR e IQD. As plantas produzidas com ureia tiveram H, NF, DC, AF e MSPA e concentração de N e Na nas folhas superiores às plantas cultivadas com T2 e T3. MSR dos tratamentos T1 e T2 foi estatisticamente superior a T3. Após mínimo processamento, as folhas das rúculas dos três tratamentos apresentaram resultado negativo para a presença de coliformes termotolerantes. O tamanho dos agregados dos solos que receberam T2 e T3 foram semelhantes entre si e superiores ao T1. A avaliação da estrutura do solo após o experimento indica que o biofertilizante de microalgas, bem como a ARB, pode agir como condicionador do solo, melhorando sua qualidade estrutural se comparado com solo adubado com ureia.

Palavras-chave: horticultura orgânica, biofertilizante de microalgas, *Eruca vesicaria* (L.) Cav.

ABSTRACT

Achieving food security for the world's growing population while simultaneously advancing more sustainable modern agriculture and proper management of conventional fertilizers is one of today's biggest challenges. Considering the potential of microalgae biofertilizer for use in organic horticultural crops, the objective was to comparatively evaluate the effect of microalgae nitrogen biofertilizer, from microalgae production in ARB, with only ARB and with conventional nitrogen source (urea) on the development of the shoot and roots of arugula. It also aimed to verify the microbiological characteristics in the leaves of the arugula at the end of the cultivation, as well as to evaluate the changes in the chemical properties of the soil and in the soil structure after the experiment. The experiment consisted of three treatments: T1 - Control, with application of urea; T2 - CW; T3 - Microalgae biomass biofertilizer. The experimental design was entirely randomized with seven repetitions with four seedlings each experimental plot. The plants morphological parameters analyzed were height (H); stem diameter (SD); shoot fresh mass (SFM); shoot dry mass (SDM); root fresh mass (RFM); root dry mass (RDM); number of leaves (NL); Root length (RL); leaf area (LA) and Dickson's Quality Index (DQI). The experimental design was entirely randomized with seven repetitions with four seedlings each experimental plot, with a total of 28 seedlings per treatment. The results show that the microalgae biofertilizer can be used as a source of nitrogen to replace urea in arugula cultivation, with similar quality of plant development according to the IQD, but with lower productivity in terms of H, NL, SD, LA, and SDM. Microalgae biomass biofertilizer provided some morphological (H, NL, SD, LA, RL, SDM, RFM, DQI) and chemical (K and Na in the leaves) parameters statistically similar to those of plants fertilized with CW. No statistical differences were found between the three treatments for the parameters RL, RFM e DQI. Plants grown with urea had higher H, NL, SD, LA and SDM, and higher N and Na concentration in leaves than plants grown with T2 and T3. RDM of treatments T1 and T2 was statistically superior to T3. After minimum processing, the leaves of the arugula from the three treatments were negative for the presence of thermotolerant coliforms. The aggregate size of the soils that received T2 and T3 were similar between each other and higher than T1. The evaluation of soil structure after the experiment indicates that microalgae biofertilizer, as well as CW, can act as a soil conditioner, improving its structural quality if compared to soil fertilized with urea.

Keywords: organic horticulture, microalgae biofertilizer, *Eruca vesicaria* (L.) Cav.

1 INTRODUÇÃO

Garantir a segurança alimentar para a crescente população mundial concomitantemente ao avanço de uma agricultura moderna mais sustentável e o manejo adequado de fertilizantes convencionais é um dos principais desafios da atualidade. A produção orgânica de hortaliças é um tipo de processo produtivo que almeja a manutenção da saúde humana, a preservação dos recursos naturais e a prevenção da degradação e contaminação desses (CARVALHAES COUTINHO et al., 2019). Alinhado à necessidade de intensificar de maneira ambientalmente adequada a produção de alimentos, o ODS 2 busca zerar a fome, alcançar a segurança alimentar, melhorar a nutrição e promover a agricultura sustentável até 2030 (UNRIC, 2018). De acordo com CURRY et al. (2021), esse objetivo representa um enorme desafio logístico e tecnológico para a produção global de alimentos.

As hortaliças são alimentos nutritivos que podem ser cultivados em pequenas propriedades e configurar a fonte principal ou alternativa de renda para pequenos produtores, pois apresentam boa rentabilidade por área cultivada. Por serem plantas com necessidade de manejo intensivo convencionalmente manual, essa atividade também possui elevada empregabilidade (BRAINER, 2021). Pequenas propriedades (até 2 hectares) produzem mais de um terço dos alimentos do mundo (LOWDER; SÁNCHEZ; BERTINI, 2021).

A rúcula vem ganhando maior espaço no mercado mundial e brasileiro de hortaliças. Essa hortaliça é um alimento rico em ferro, cálcio, fósforo, vitaminas A e C. Além de servir como alimento, possui propriedades nutracêuticas e depurativas (AGUIAR et al., 2014; VIEIRA, 2010). Segundo o Censo Agropecuário 2017 existem mais de 336 mil estabelecimentos no Brasil com total ou parte de sua atividade econômica com horticultura, dos quais 6,1% produzem rúcula. O Rio de Janeiro concentra 4,5% das propriedades com produção de horticultura do país e 603 estabelecimentos com produção de rúcula (IBGE, 2022). A espécie de rúcula mais cultivada no Brasil é a denominada *Eruca vesicaria* (L.) Cav (AGUIAR et al., 2014).

Apesar de absorverem relativamente pequenas quantidades de nutrientes, quando comparadas às outras culturas, as hortaliças folhosas são consideradas exigentes em nutrientes (GRANGEIRO et al., 2011). Considerando seu potencial nutritivo, a biomassa de microalgas pode atuar como um fertilizante orgânico de liberação lenta para fornecer nutrientes para as plantas e manter os solos e corpos de água livres de contaminação com cargas severas de nutrientes. Um estudo com rúcula concluiu que, de forma geral, a aplicação de microalgas durante o cultivo tem efeito positivo no seu crescimento (SADAK TURHAN et al., 2022).

Pesquisas recentes mostram que o uso de biofertilizantes de microalgas tem associação positiva com a produtividade e crescimento de culturas agrícolas (DAGNAISSER et al., 2022). Entretanto, as tecnologias existentes e a falta de conhecimento sobre a ação dos biofertilizantes de microalgas restringem sua ampla aplicação e integração nas práticas agrícolas. Ainda, existem problemas a serem solucionados para seu amplo uso na agricultura moderna. Um grande desafio é a identificação de espécies de microalgas e combinações de espécies com efeitos favoráveis ao crescimento e a produtividade das plantas em estudos de campo com diferentes tipos de culturas agrícolas em diferentes regiões edafoclimáticas, e com isso, entender a eficiência do uso do biofertilizante.

A hipótese dessa pesquisa é que a rúcula cultivada com adição do biofertilizante de biomassa de microalgas como fonte de nitrogênio alcançará parâmetros morfológicos semelhantes aos das plantas cultivadas com fertilizante nitrogenado convencional (ureia) e com aplicação de ARB como fonte de nitrogênio.

2 OBJETIVOS

Avaliar comparativamente o efeito do biofertilizante de biomassa de microalgas, oriundo da produção de microalgas em ARB, com a aplicação de ARB e com o uso de fonte convencional de nitrogênio (ureia) no desenvolvimento da parte aérea e das raízes da rúcula;

Verificar as características microbiológicas nas folhas das rúculas ao final do cultivo;

Avaliar alterações nas propriedades químicas do solo e na estrutura do solo após o experimento.

3 MATERIAIS E MÉTODO

3.1 Produção de Rúcula e Delineamento Experimental

A etapa de produção de plantas foi iniciada com a coleta do solo a ser utilizado como substrato de desenvolvimento. A amostragem de terra e o cultivo da rúcula foram realizados na Fazendinha Agroecológica km 47. O solo escolhido foi o horizonte B textural de um Argissolo Amarelo Eutrófico típico, descrito por NASCIMENTO (2019) localizado nas coordenadas 22°45'19"S 43°40'27"O. O solo foi seco ao ar por 7 dias. Após período de secagem, o solo foi destorroado e peneirado em peneira de 2 mm para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

As sementes de rúcula variedade Gigante Folha Larga, com pureza de 100% e taxa de germinação de 93% (informadas pelo fabricante), foram semeadas em bandejas de isopor contendo substrato composto por 83% de húmus, 15% de carvão vegetal e 2% de torta de mamona (Figura 5). A produção da rúcula foi conduzida na estufa do Sistema integrado de produção de plantas da Fazendinha Agroecológica km 47. A rúcula foi cultivada entre os meses de maio e junho, durante o inverno do ano de 2022. O município de Seropédica está localizado em uma região de clima Aw, segundo a classificação de Köppen, com chuvas concentradas no período novembro a março, precipitação anual média de 1.213 mm e temperatura média anual de 24,5 °C (JORGE et al. 2022; ALVARES et al., 2013; PEEL et al., 2007).



Figura 5. Bandeja de rúcula uma semana após a semeadura.

O experimento foi composto pelos tratamentos: T1 – Controle, com aplicação de fonte convencional de nitrogênio (ureia); T2 – Dose calculada de ARB equivalente à fertilização convencional de N; T3 – Dose calculada do biofertilizante de biomassa de microalgas equivalente à fertilização convencional de N. As doses de aplicação da ARB e do biofertilizante foram calculadas conforme descrito nos itens 3.6 e 4.4 do Capítulo 1 desta dissertação. Para a

adubação do tratamento controle com ureia, foi aplicado quantidade equivalente a 120 kg N ha⁻¹, considerando que a ureia possui 45% de N em sua composição (RODRIGUES FREIRE, 2013). Foram realizadas 3 aplicações de ureia por vaso, em igual quantidade, totalizando 0,216 g de ureia por vaso ao longo do cultivo.

Todos os vasos receberam adubação complementar com adubo Forth Plantio não nitrogenado contendo P (12%), Ca (21%), Mg (6%), S (4,8%), B (0,11%), Cu (0,07%), Fe (0,2%), Mn (0,1%), Mo (0,005%), Zn (0,18%) e Si (0,1%). Além de não conter nitrogênio, o adubo não continha potássio em sua composição. Segundo SANTOS et al. (2017), as variáveis altura da parte aérea, massa da matéria seca e número de folhas de rúcula não são influenciadas pela adubação potássica. Foram adicionados aproximadamente 4 g (4,9 kg ha⁻¹ ou 2,5 mg kg⁻¹) do adubo não nitrogenado nos vasos dos tratamentos T1, T2 e T3, conforme recomendação do fabricante para o volume do vaso utilizado no experimento.

Aos 6 DAS foi realizado o desbaste deixando apenas uma plântula por célula. Aos 21 DAS, as plantas visualmente mais vigorosas foram transferidas aos vasos de 0,8L para início da aplicação dos tratamentos. Os tratamentos foram aplicados, parceladamente, ao longo do ciclo da rúcula, que correspondeu a 26 dias após o transplantio (DAT).

O delineamento experimental utilizado no cultivo da rúcula foi o inteiramente casualizado (DIC), com três tratamentos em sete repetições. O posicionamento dos tratamentos nos vasos foi realizado de forma aleatória por meio de sorteio. O sorteio foi feito no software Microsoft Excel. Cada repetição é composta por quatro plantas, resultando em 28 plantas por tratamento e 84 plantas no total. O croqui do experimento é apresentado na Figura 6.

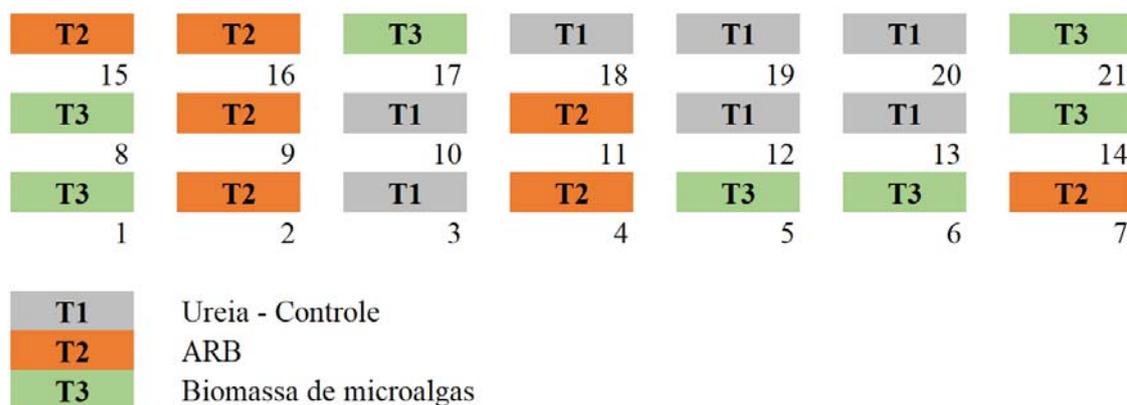


Figura 6. Ilustração do croqui do experimento.

A umidade do solo foi mantida acima de 60% da capacidade de campo durante o período de cultivo, assim como no experimento de RENUKA et al. (2016). O turno de rega foi de 2 dias. O monitoramento da umidade do solo foi realizado por meio de três medidores de umidade do modelo WN1903, previamente testados no solo do experimento, cada um alocado em um dos vasos que compunha cada um dos tratamentos avaliados.

3.1.1 Análise de parâmetros morfológicos

As avaliações consistiram na mensuração da altura da parte aérea (H), com uso de escalímetro (escala 1:100), e contagem do número de folhas (NF) ao longo do tempo de formação das plantas. Na última medição, além da altura foi medido o diâmetro do caule (DC), com paquímetro.

Após essas medições, ao final do ciclo de cultivo, as plantas foram fracionadas para a determinação dos parâmetros: área foliar; biomassa fresca e seca da parte aérea e biomassa fresca e seca das raízes. Cada parte da planta foi devidamente identificada e acondicionada em

sacos de papel para secagem em estufa de circulação de ar forçada, a temperatura de 60 °C até peso constante. Passada a etapa de secagem, o material foi pesado para obtenção da matéria seca de parte aérea (MSPA) e matéria seca de raízes (MSR). A matéria seca total (MST) foi obtida por meio da soma de MSPA e MSR.

O cálculo do Índice de Qualidade de Dickson (IQD) expressa a qualidade de mudas com base nos seus parâmetros morfológicos (DICKSON; LEAF; HOSNER, 1960). Salienta-se que quanto maior o IQD considera-se melhor a qualidade das mudas (ARAÚJO et al., 2018).

$$IQD = \frac{MST}{H/DC + MSPA/MSR}$$

Em que:

MST é a matéria seca total (g);

H é a altura da parte aérea (cm);

DC é o diâmetro do caule (mm);

MSPA é a matéria seca de parte aérea (g);

MSR é a matéria seca de raízes (g).

3.1.2 Análise química das folhas de rúcula

As partes aéreas de três plantas de cada vaso foram selecionadas, aleatoriamente, para análise química das folhas. O material foi seco em estufa à 60°C até peso constante. As folhas secas foram trituradas para análise do tecido vegetal com objetivo de determinar os nutrientes (K e N) e o Na na planta.

A análise de K e Na seguiu O método por via úmida de solubilização nítrico perclórica com digestão das amostras feita em micro-ondas e leitura em fotômetro de chama (CARMO et al., 2000). A determinação analítica de nitrogênio foi realizada pela metodologia semi-micro Kjeldahl. Esse método prevê a solubilização sulfúrica que transforma proteína e aminoácidos do tecido vegetal em amônio e após sua destilação e complexação é feita a titulação com solução padronizada de ácido sulfúrico diluído (CARMO et al., 2000).

3.1.3 Análise microbiológica das folhas de rúcula

Uma planta de cinco vasos de cada tratamento foi separada para análise microbiológica das folhas de rúcula. O material foi acondicionado em sacos plásticos e reservado na geladeira entre 1 °C e 7 °C por duas semanas. Após esse período, as folhas foram lavadas em água corrente, higienizadas em maço com solução contendo 1 colher de sopa de hipoclorito de sódio (2 a 2,5% de cloro ativo) diluído em 1 L de água por 10 min e enxaguadas com água destilada.

Amostras de 1g de cada planta foram colocadas em tubos de ensaio contendo 9 mL de água peptonada esterilizada em autoclave (121 °C por 15 minutos). Os tubos foram homogeneizados em Vortex Mixer (Kasvi basic modelo K45-2810) por 1 min e guardados na geladeira por 1 dia (Figura 7).



Figura 7. Amostras de folhas de rúcula após homogeneização

No dia seguinte, as amostras foram novamente homogeneizadas e foi transferido 1 mL de cada tubo de ensaio para 3 tubos de ensaio contendo 9 mL de Caldo A1 Base previamente esterilizado em autoclave (121 °C por 15 minutos) e com um tubo de Durham invertido dentro. O Caldo A1 Base é recomendado para detecção de coliformes termotolerantes em 24 h de amostras de água tratada, água residuária e alimentos. Portanto, os tubos com as amostras e o meio foram submetidos a banho-maria (45 °C) e agitação por 24 h para obtenção do resultado de presença ou ausência de coliformes termotolerantes nas folhas de rúcula por meio da observação, ou não, de gases acumulados nos tubos de Durham, respectivamente. A caracterização microbiológica foi realizada no Laboratório de Microbiologia do Departamento de Tecnologia de Alimentos (DTA/IT UFRRJ).

3.2 Análise do Solo

O solo utilizado no cultivo foi coletado no horizonte B textural de um Argissolo Amarelo Eutrófico típico, descrito por NASCIMENTO (2019) e detalhado na Tabela 4 e Tabela 5. Segundo NASCIMENTO (2019), as análises do solo foram realizadas nos laboratórios do Departamento de Solos do Instituto de Agronomia (DS/IA/UFRRJ) pelos métodos atestados pela Embrapa, conforme descrito em TEIXEIRA et al. (2017).

Tabela 4. Caracterização morfológica e física do solo

ANÁLISE MORFOLÓGICA E FÍSICA									
Hor	Profundidade (cm)	Gran. (g kg ⁻¹)		Cor úmida	Ds Mg m ⁻³	Dp Mg m ⁻³	Porosidade (%)		Ug (%)
		Areia	Argila				Macro	Micro	
Bt2	89-108	446	441	Bruno-amarelado (10YR 5/8)	1,49	2,57	22,0	34,2	5,4

Legenda: Hor - Horizonte; Gran. - Granulometria; Ds - Densidade do solo; Dp - Densidade da partícula; Ug - Umidade gravimétrica.

Tabela 5. Caracterização química do solo

ANÁLISE QUÍMICA											
Hor	Ca	Mg	H+Al	Al	S	T	K	Na	P	V	pH
	----- (cmol _c dm ³) -----			-----			(mg kg ⁻¹)		(mg L ⁻¹)	%	água
Bt2	2,3	1,7	2,2	0,0	4,06	6,26	3,91	11,5	4	65	5,6

Legenda: Na - Sódio; Ca - Cálcio; Mg - Magnésio; K - Potássio; H+Al - Acidez potencial; Al - Alumínio; S - Soma de bases trocáveis; T - Capacidade de troca de cátions; V - Percentagem de saturação por bases; P - Fósforo; e pH - Potencial hidrogeniônico.

3.2.1 Caracterização química do solo após o cultivo da rúcula

As análises químicas do solo após a aplicação dos três tratamentos foram realizadas conforme metodologia descrita em TEIXEIRA et al. (2017) no Laboratório de Matéria Orgânica do Solo - LMOS (Departamento de Agrotecnologias e Sustentabilidade/IA/UFRRJ).

3.2.2 Caracterização da estrutura do solo após o cultivo da rúcula

A caracterização da estrutura do solo após o experimento foi realizada por meio da análise do grau de desenvolvimento da estrutura dos agregados do solo (GDE), da forma da unidade estrutural (agregado) e o tamanho da estrutura (SANTOS et al., 2005). Foi feita avaliação em cinco vasos em cada tratamento, selecionados de forma aleatória. Para a determinação do tamanho da estrutura foram selecionados aleatoriamente cinco agregados de cada amostra de terra. Os agregados foram medidos com escalímetro (escala 1:100).

As formas possíveis de agregados, conforme a metodologia de referência, são: laminar, prismática, em blocos ou poliédrica e granular ou esferoidal. O GDE é a manifestação das condições de coesão dentro e fora dos agregados e em materiais com unidades estruturais. Esse foi avaliado e classificado em função da resistência dos agregados à pressão manual conforme (SANTOS et al., 2005) em:

- 1) Fraca: unidades estruturais são pouco frequentes em relação à terra solta;
- 2) Moderada: as unidades estruturais são bem definidas e há pouco material solto;
- 3) Forte: as unidades estruturais são separadas com facilidade e quase não se observa material de solo solto.

A definição da qualidade estrutural foi realizada por meio da adaptação do critério “Classes de tamanho de agregados” do Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES) (RALISCH et al., 2017). Esse critério prevê a avaliação da proporção relativa, em porcentagem, entre diferentes tamanhos de agregados, que são medidos no sentido de sua maior dimensão ou diâmetro. As classes de tamanho de agregados consideradas foram: menores que 1 cm; entre 1 e 4 cm; entre 4 e 7 cm; e maiores que 7 cm de diâmetro. A Tabela 6 mostra a atribuição das notas de qualidade estrutural conforme adaptação de RALISCH et al. (2017).

Tabela 6. Chave para atribuição das notas de qualidade estrutural para amostras de terra (Q_{ec})

Condição	Amostra com evidências de conservação/recuperação			Amostra com evidências de degradação		
	$Q_{ec}=6$	$Q_{ec}=5$	$Q_{ec}=4$	$Q_{ec}=3$	$Q_{ec}=2$	$Q_{ec}=1$
Tamanho do agregado e % agregado na amostra de terra	Mais de 70% de agregados com 1 a 4 cm	50 a 70% de agregados de 1 a 4 cm	Menos de 50% de agregados de 1 a 4 cm	Menos de 50% de agregados menores que 1 cm e maiores que 7 cm	50 a 70 % de agregados menores que 1 cm e maiores que 7 cm	Mais de 70% de agregados menores que 1 cm e maiores que 7 cm

3.3 Análise Estatística dos Dados

Os dados de todas as variáveis mensuradas e estimadas por vaso foram submetidos à análise de variância (ANOVA) no software R (versão 4.2.0) e, havendo significância, a comparação entre eles foi realizada por meio do teste Tukey, à 5% de probabilidade de erro.

Os dados que não apresentaram alguma das pré-suposições da ANOVA, tais como homogeneidade de variâncias (teste de Bartlett) e normalidade dos resíduos (teste Shapiro-Wilk), foram transformados conforme Box-cox e reprocessados. O reprocessamento consistiu em nova ANOVA e, havendo significância, a comparação foi realizada por meio do teste Tukey, à 5% ($p\text{-value} \leq 0,05$) ou à 1% ($p\text{-value} \leq 0,01$) de probabilidade de erro. Nos casos em que, mesmo após a transformação, os dados não atenderam as pré-suposições da ANOVA, os resultados foram analisados por estatística descritiva (média, desvio padrão, porcentagem). Todas as tabelas e gráficos foram feitas utilizando o software Microsoft Excel[®].

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Produção de Rúcula

O cultivo da rúcula durou 26 dias após o transplante. Ao final do cultivo, as plantas dos tratamentos T1, T2 e T3 apresentavam algumas diferenças visuais, como altura e área foliar (Figura 8, Figura 9 e Figura 10). Os resultados da comparação estatística entre os parâmetros morfológicos das plantas são discutidos no item 4.1.1.



Figura 8. Experimento aos 26 DAT.



A



B



C



D

Figura 9. Plantas de rúcula no 26 DAT. A: Vasos 1 (T3), 2 (T2) e 3 (T1); B: Vasos 4 (T2), 5 (T3) e 6 (T3); C: Vasos 7 (T2), 8 (T3) e 9 (T2); D: Vasos 10 (T1), 11 (T2) e 12 (T1).

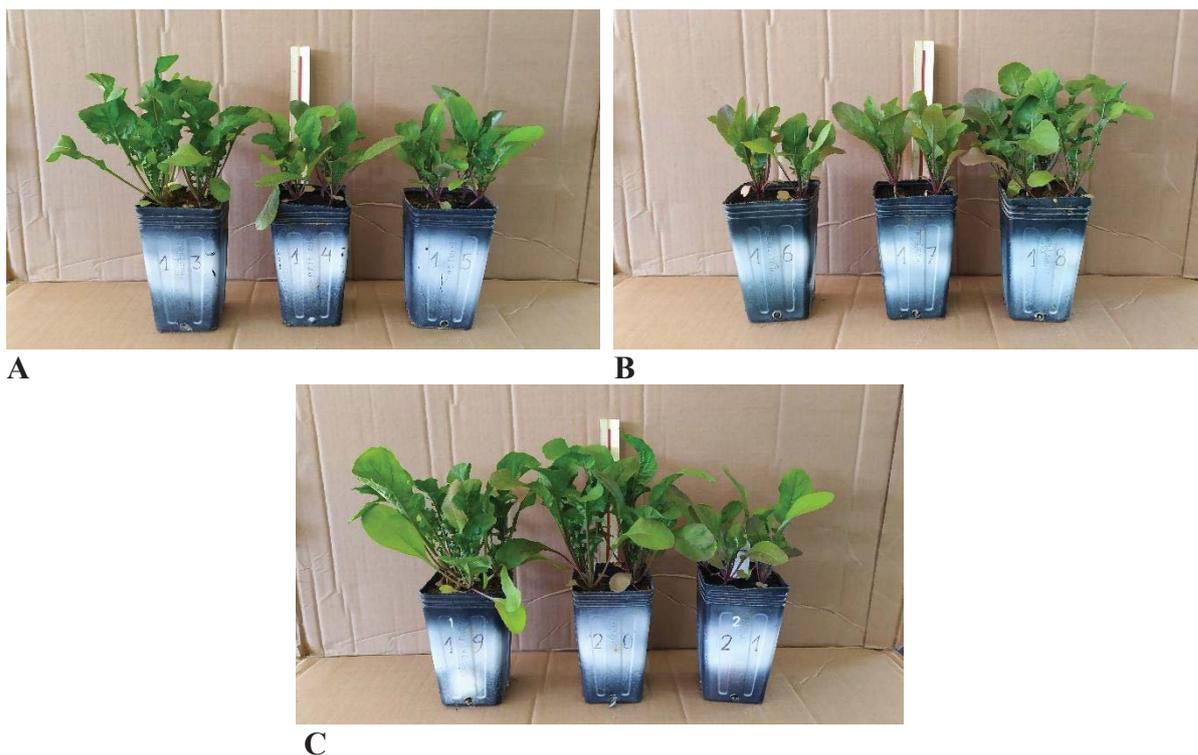


Figura 10. Plantas de rúcula no 26 DAT. A: Vasos 13 (T1), 14 (T3) e 15 (T2); B: Vasos 16 (T2), 17 (T3) e 18 (T1); C: Vasos 19 (T1), 20 (T1) e 21 (T3).

4.1.1 Análise de parâmetros morfológicos

O monitoramento do crescimento da rúcula, medido pela altura e o número de folhas em função do tempo para cada tratamento, constam na Figura 11 e na Figura 12. Ambos os parâmetros avaliados foram significativamente maiores nas plantas produzidas com adubação convencional de ureia (T1) aos 26 DAT. As fertirrigações feitas com ARB (T2) e com o biofertilizante de microalgas (T3) não apresentaram diferença estatística entre si com relação à altura da parte aérea das plantas e ao número de folhas ao final do cultivo. De acordo com o monitoramento, até 7 DAT as médias de altura e as médias de número de folhas dos tratamentos eram estatisticamente iguais. Somente após a primeira semana do cultivo o tratamento com ureia se destacou, possivelmente, em função da liberação mais rápida de N desse biofertilizante em relação a ARB e ao biofertilizante, os quais ainda necessitavam ser degradados no solo.

Utilizando biofertilizante de microalgas (*Chlorella* sp. e *Scenedesmus* sp.) em cultivo de manjerição (*Ocimum basilicum* L.), GARCÍA-ORELLANA et al. (2016) verificaram que a aplicação do fertilizante orgânico não teve efeito significativo sobre a altura das plantas em comparação com o tratamento controle (sem biofertilizante). Comparando fertilizante orgânico, fertilizante de microalgas (*Nannochloropsis oculata*) e fertilizante convencional, o crescimento inicial de tomate foi mais rápido com o uso do fertilizante inorgânico convencional, certamente pela pronta disponibilidade dos nutrientes, tais como o nitrato (COPPENS et al., 2016). Os resultados de KIM et al. (2018) conduzindo um experimento com cebolinha chinesa tratada com 0,4% *Chlorella fusca* tiveram menor altura do que aquelas que não receberam o tratamento. Em contrapartida, diversos trabalhos relataram aumento na altura de culturas produzidas com fertilização com microalgas (ALVAREZ et al., 2021; DINESHKUMAR et al., 2019; GARCIA-GONZALEZ; SOMMERFELD, 2016).

Uma pesquisa acerca do efeito bioestimulante do extrato de polissacarídeos de microalgas no crescimento de tomate (*Solanum lycopersicum*) identificou um comportamento

inversamente proporcional entre a altura das plantas e a concentração do extrato de *A. platensis* MS001 (Spirulina) aplicado na fertirrigação (RACHIDI et al., 2020). Esse resultado é particularmente interessante devido ao extrato das outras duas espécies estudadas, *Dunaleilla salina* MS002 e *Porphyridium* sp. MS099 terem registrado efeito positivo no crescimento em altura, em comparação ao controle, quanto maior foram as suas concentrações. Fato é que as plantas que receberam 1 mg mL⁻¹ de extrato de Spirulina tiveram crescimento em altura da parte aérea estatisticamente semelhante ao controle, enquanto as plantas que receberam 0,25 mg mL⁻¹ e 0,5 mg mL⁻¹ tiveram crescimento estatisticamente superior ao controle à ($p = 0,1\%$). A razão para o tratamento com maior concentração de Spirulina (1 mg mL⁻¹) ter tido desempenho inferior aos de menores concentrações (0,25 mg mL⁻¹ e 0,5 mg mL⁻¹) não é amplamente discutida no artigo científico. Entretanto, o mesmo comportamento foi identificado nas concentrações de clorofila *a* e *b* (RACHIDI et al., 2020). Considerando que as clorofilas *a* e *b* desempenham função primordial na produção de energia e fotoassimilados que servem como uma base para o crescimento celular e adaptação ambiental (LOPES et al., 2023; SILVA et al., 2020; BATISTA et al., 2019; TAIZ et al., 2017), altas concentrações de Spirulina parecem influenciar negativamente o crescimento da parte aérea de algumas plantas. Porém, análises do conteúdo de clorofila *a* e *b* não foram realizadas no presente experimento, sendo necessárias mais pesquisas para constatar tal suposição.

Efeito inibitório de crescimento, comparado ao tratamento controle, em plantas de tremço-amarelo (*Lupinus luteus*) que receberam extrato de *Spirulina platensis* mais concentrado (1,0%) foi relatado por SHEDEED et al. (2022). Entretanto, o conteúdo de nutrientes (K e Mg), crescimento e produtividade de *L. luteus* tiveram incremento com o uso do extrato da microalga em baixa concentração (0,25%). Os autores atribuem o desempenho no desenvolvimento das plantas aos compostos biologicamente ativos gerados pela microalga em baixa concentração (0,25%), tais como fitormônios, que promovem o desenvolvimento e produtividade das plantas. No presente estudo, o biofertilizante não foi diluído, ou seja, está concentrado com todo o extrato produzido durante o cultivo em ARB. Portanto, existe a possibilidade da concentração da Spirulina, em certo nível, ter gerado um efeito inibitório no crescimento da rúcula. Por outro lado, tal fato não explicaria a similaridade do desenvolvimento das rúculas que receberam somente ARB com as que receberam o biofertilizante de microalgas.

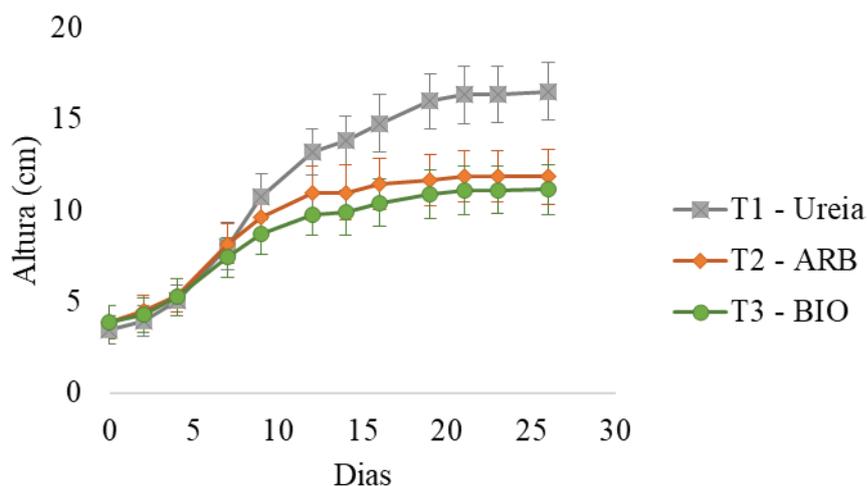


Figura 11. Altura média da parte aérea da rúcula por tratamento ao longo de 26 DAT (Tukey, p -value $\leq 0,05$).

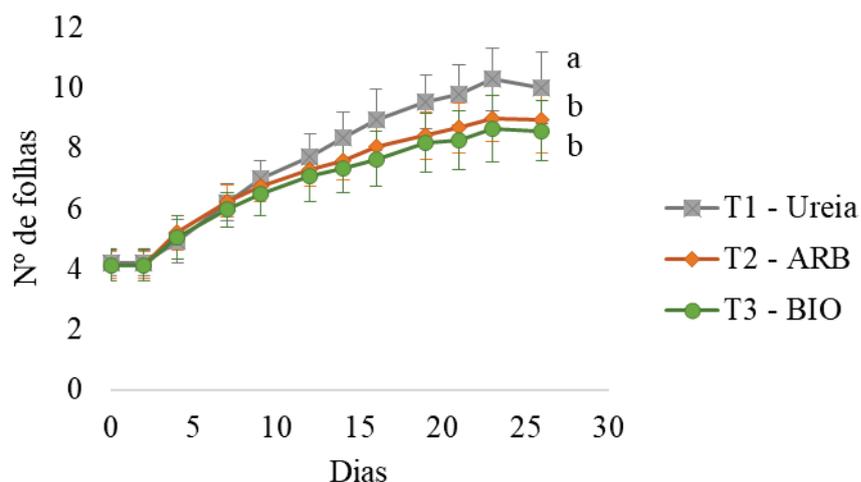


Figura 12. Número médio de folhas por tratamento ao longo de 26 DAT (Tukey, p -value $\leq 0,05$).

O DC e a área foliar seguiram o mesmo padrão apresentado pelos parâmetros altura da parte aérea e número de folhas, ou seja, o T1 se mostrou como melhor tratamento (Figura 13 e Figura 14). A aplicação de *Chlorella* sp. como bioestimulante em plantas de meloeiro “cantaloupe” e “amarelo” alcançaram maiores valores de DC em comparação com o tratamento testemunha em estudo conduzido por FERREIRA (2022). As folhas de rúcula que receberam adubação com ureia tiveram área média foliar de $14,1\text{cm}^2 (\pm 0,8)$, enquanto as plantas fertirrigadas com ARB e biofertilizante de microalgas chegaram a $9,2\text{cm}^2 (\pm 0,3)$ e $9,1\text{cm}^2 (\pm 0,4)$, respectivamente. Uma correlação positiva entre aplicação de microalga *Chlorella vulgaris* Beijerinck (Beijerinck), diâmetro do coleto e área foliar foi identificada em rúcula (*Eruca vesicaria* ssp. sativa Mill.) SADAK TURHAN et al. (2022), diferentemente do presente estudo.

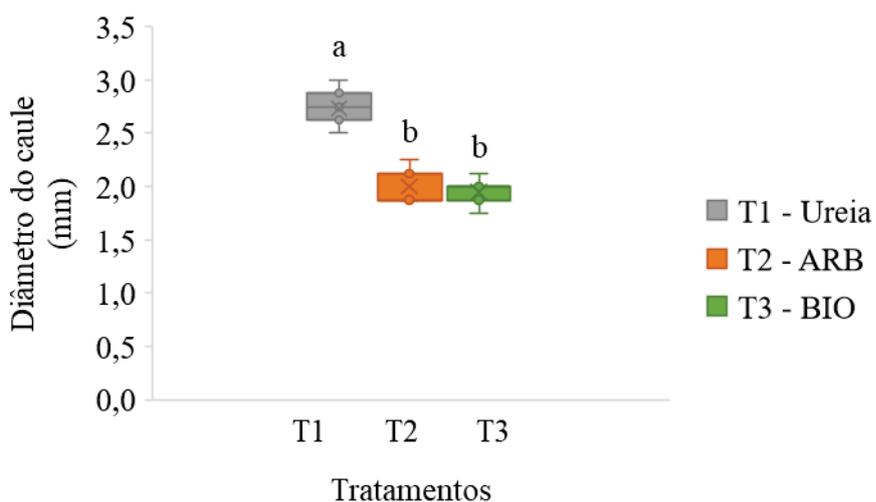


Figura 13. DC por tratamento aos 26 DAT (Tukey, p -value $\leq 0,05$).

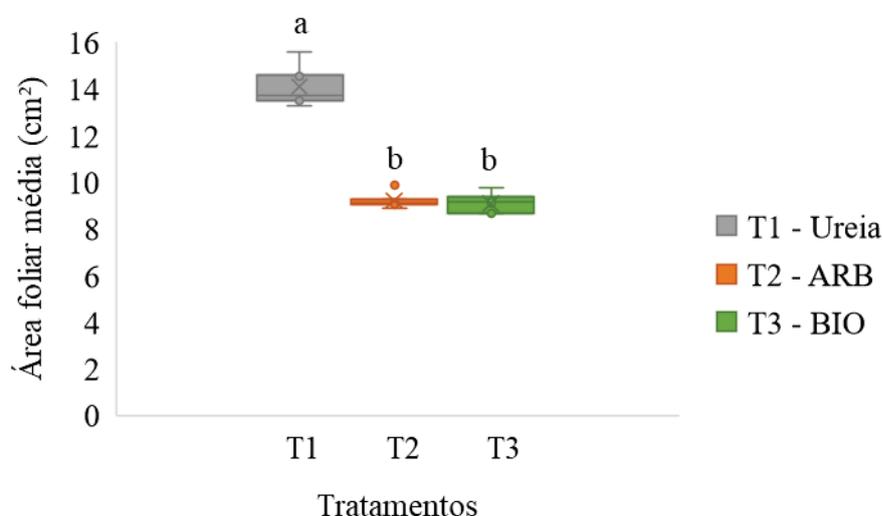


Figura 14. Área foliar por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).

Um estudo que avaliou o potencial bioestimulante de microalgas cultivadas em águas residuárias de suinocultura identificou efeito benéfico das microalgas (*Tetrademus obliquus*, *Chlorella protothecoides*, *Chlorella vulgaris*, *Synechocystis* sp.) para a germinação e o crescimento das raízes (CR), com comprimentos superiores ao controle, de cevada (*Hordeum vulgare*), pepino (*Cucumis sativus*), soja (*Glycine max*), tomate (*Lycopersicon esculentum*), agrião (*Nasturium officinale*), e trigo (*Triticum aestivum*) (FERREIRA et al., 2021). No presente estudo, de acordo com o teste F ($p = 5\%$), o CR médio dos três tratamentos não apresentou diferença estatística. Logo, os três tratamentos tiveram mesmo desempenho nesse parâmetro morfológico. Uma possível explicação para essa semelhança pode ter sido a limitação de crescimento dentro do vaso do plantio. Os comprimentos médios para o T1, T2 e T3 foram 33,4 cm ($\pm 7,8$), 27,1 cm ($\pm 5,9$) e 34,2 cm ($\pm 5,2$), respectivamente (Figura 15 e Figura 16). RACHIDI et al. (2020) também identificaram comprimentos de raízes estatisticamente iguais em tomateiros que receberam fertirrigação com variadas concentrações de extrato de microalgas em comparação com o controle.

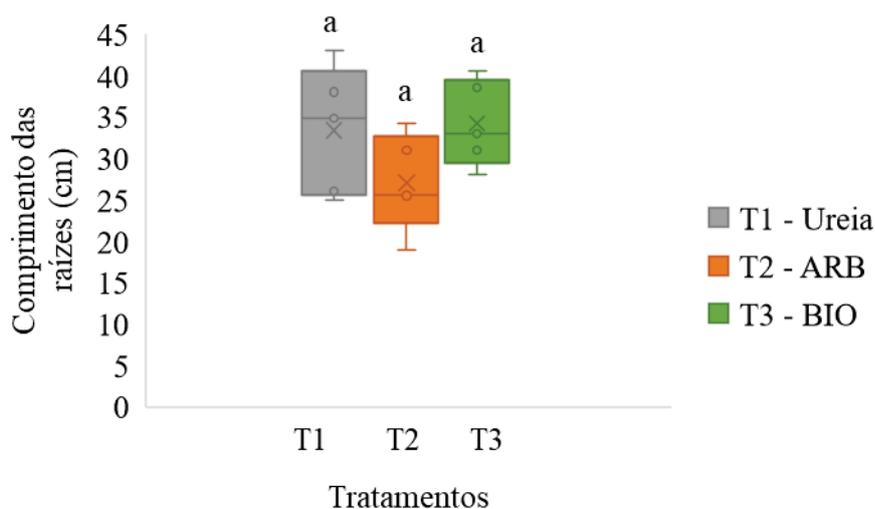


Figura 15. Comprimento das raízes da rúcula por tratamento, aos 26 DAT.

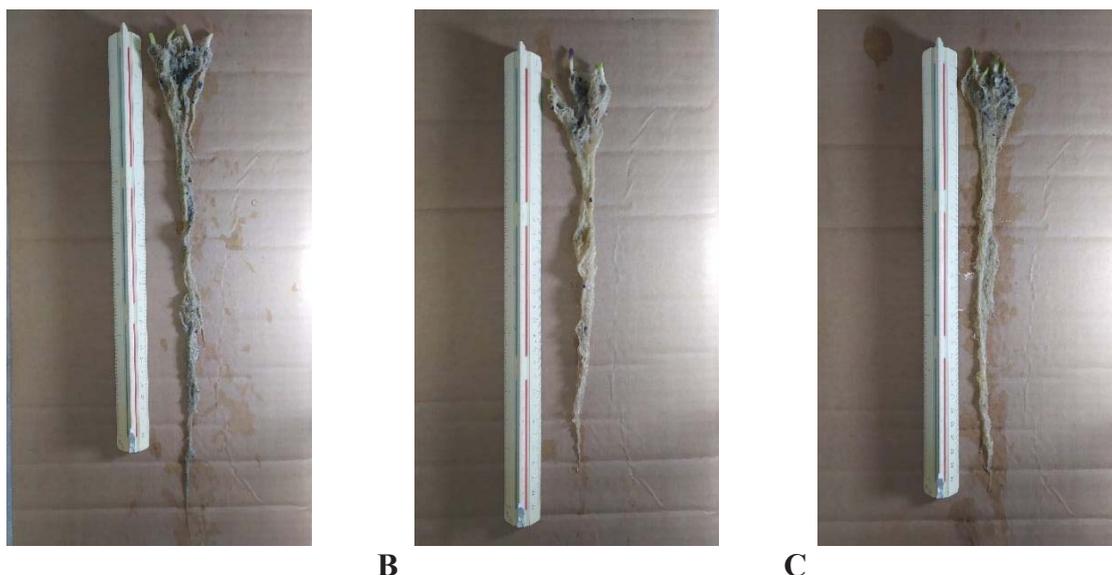


Figura 16. Detalhe do comprimento das raízes de um vaso de cada tratamentos do experimento. A - T1; B - T2; C - T3.

Os dados da massa fresca da parte aérea (MFPA) não apresentaram homoscedasticidade das variâncias e normalidade dos resíduos mesmo após transformação por Box-cox e reprocessamento por vaso e por planta. A estatística descritiva é apresentada na Tabela 7. A MFPA de T2 e T3 representam 54% e 48% da média obtida para T1. Ou seja, T1 apresentou média proporcionalmente superior a T2 e T3. Entretanto, não foi possível confirmar a diferença ou semelhança estatística dos tratamentos pela ANOVA. Ao analisar a massa fresca e seca da parte aérea de plantas de rúcula produzidas com diferentes doses de fertilizante químico convencional (NPK) com e sem aplicação de microalga *C. vulgaris* Beyerinck (Beijerinck), SADAK TURHAN et al. (2022) não identificaram diferença estatística para esses parâmetros entre os tratamentos.

Tabela 7. Estatística descritiva para a Massa Fresca da Parte Aérea da rúcula nos diferentes tratamentos: T1 – Ureia; T2 – ARB; T3 – Biofertilizante de biomassa de microalgas.

Tratamento	Média (g)	DP (g)
T1	4,9	±0,9
T2	2,6	±0,2
T3	2,4	±0,2

A análise da MSPA demonstrou diferença estatística entre os tratamentos, constatando que T1 foi superior a T2 e T3 (Figura 17). Os tratamentos T2 e T3 não apresentaram diferença estatística. Na sua composição, em cada 100 g de matéria fresca, usualmente há em média 91,7 g de água, 2,58 g de proteína e 1,6 g de fibra (AGUIAR et al., 2014). A parte aérea das plantas apresentou média de 87,5% (±1,2), 85,6% (±5,2) e 85,8% (±3,4) de água nos tratamentos T1, T2 e T3, respectivamente.

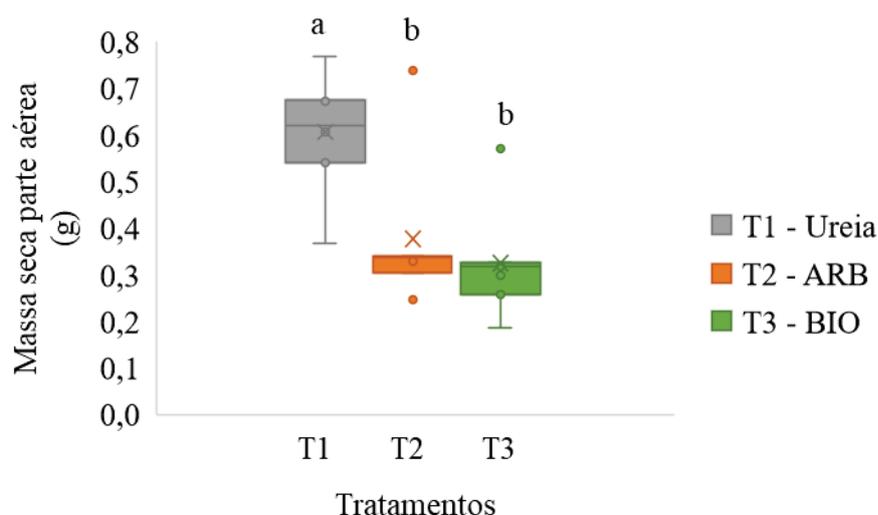


Figura 17. Massa Seca da Parte Aérea da rúcula por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,01$).

De acordo com o teste F, as MFR dos três tratamentos não apresentaram diferença estatística (Figura 18). O valor médio de MFR dos tratamentos T1, T2 e T3 foi 7,19 g ($\pm 0,65$), 7,43 g ($\pm 2,06$) e 6,41 g ($\pm 0,86$), respectivamente. Assim como neste estudo, PUGLISI et al. (2020) não identificaram diferença estatística entre as massas das raízes de alface ao longo de duas semanas de cultivo com *Scenedesmus quadricauda* como bioestimulante em comparação com o tratamento controle.

Por outro lado, o parâmetro MSR apresentou diferença estatística entre os tratamentos, sendo T1 e T2 com valores superiores ao T3 (Figura 19). Esse resultado pode ser interpretado de forma conjunta com o comprimento médio das raízes, pois demonstra que mesmo com comprimentos semelhantes, o tratamento T3 apresentou raízes mais tenras e com maior concentração de água do que os tratamentos T1 e T2. Diferente do resultado obtido no presente estudo, LOPES et al. (2023) identificaram relação positiva entre a aplicação de biofertilizante de microalgas e parâmetros morfológicos de feijoeiro cultivar “Pérola” como massa fresca e seca da parte aérea, massa seca das raízes e massa fresca e seca totais. Pesos totais de plantas de alface também foram maiores em plantas que receberam fertilização com microalga em comparação com aquelas que não receberam (PUGLISI et al., 2020).

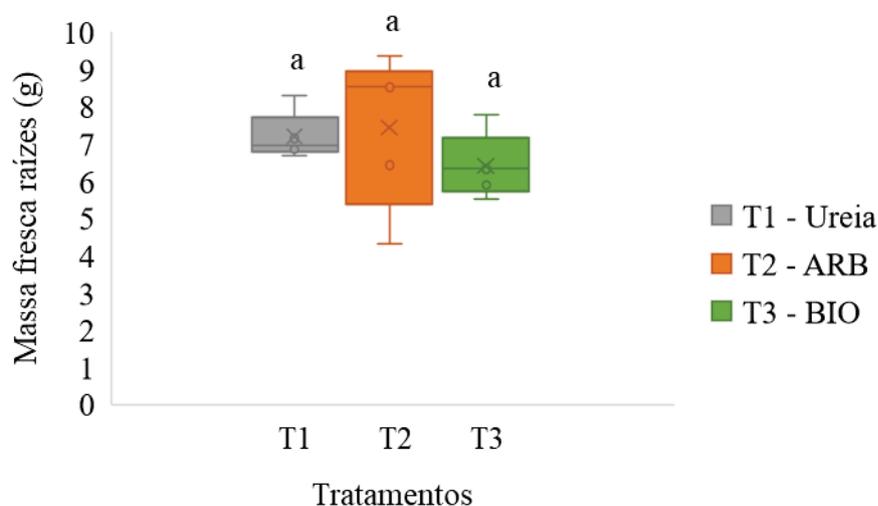


Figura 18. Massa Fresca das Raízes por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).

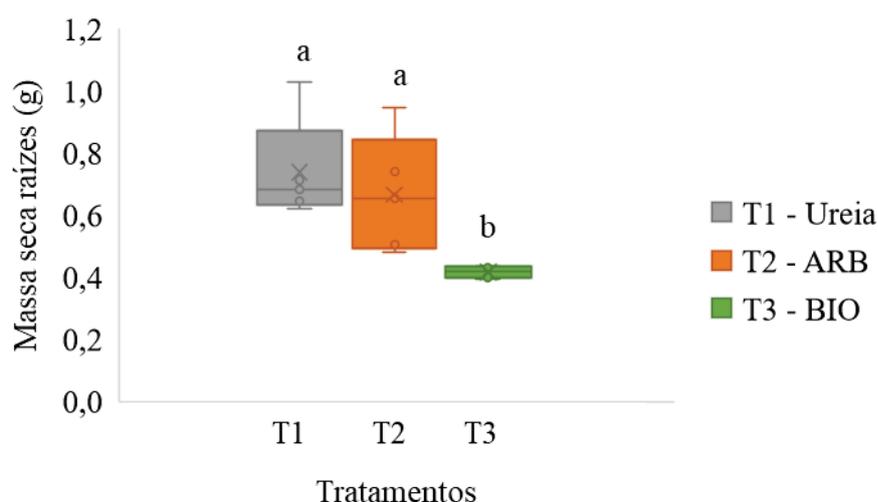


Figura 19. MSR por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,01$).

Os IQD das plantas dos três tratamentos apresentaram resultados estatisticamente iguais à 5% de probabilidade de erro. Portanto, as rúculas produzidas com fonte de nitrogênio proveniente de ureia, ARB e biofertilizante têm qualidade semelhantes de acordo com o IQD. Esse mesmo índice foi utilizado para determinação da qualidade do desenvolvimento de plantas de alface sob efeito de diferentes condicionadores de substrato (T1 - arroz carbonizado; T2 - fibra casca de coco; T3 - composto orgânico; T4 – substrato comercial Golden® utilizado como tratamento controle; T5 - estipe de palmeira picado; e, T6 - caule decomposto de sumaúma). O substrato contendo estipe de palmeira picada como condicionador proporcionou maior IQD das plantas (SIMÕES et al., 2015). Já em experimento utilizando biomassa de *Spirulina platensis* na produção de cajueiro (*Anacardium occidentale* L.), o IQD das plantas foi negativamente influenciado pelo aumento na concentração da microalga aplicada sobre as folhas (FERREIRA et al., 2022).

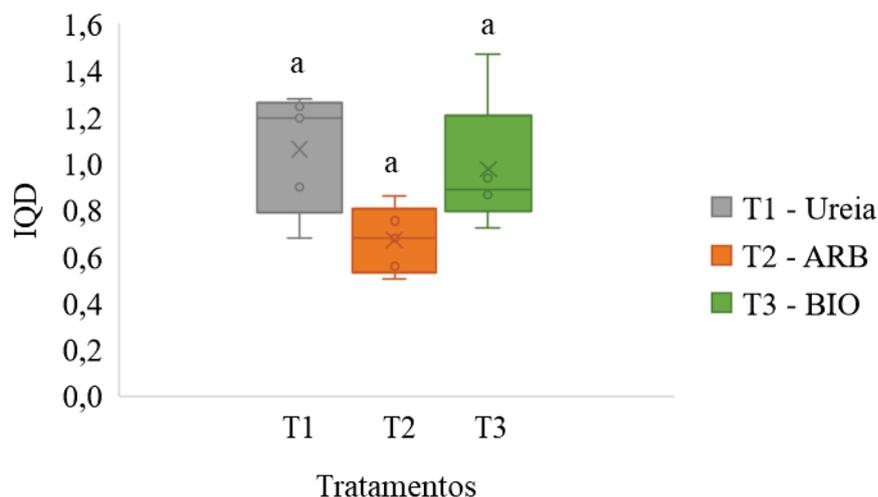


Figura 20. Índice de Qualidade de Dickson por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).

A eficiência dos biofertilizantes orgânicos frente aos fertilizantes minerais atribui-se ao fato de já se encontrarem em avançado grau de “decomposição” ou estabilização, possibilitando a liberação dos nutrientes para as plantas de maneira mais fácil (MATOS, 2016; ARRUDA et al., 2002). Entretanto, quando o biofertilizante é à base de microalgas, esse padrão de decomposição parece não se aplicar. O biofertilizante de microalgas é um bioproduto orgânico em que as microalgas não estão necessariamente decompostas. No caso do presente estudo, o

biofertilizante foi conservado sob congelamento até o dia da aplicação, sendo assim, para que os nutrientes presentes nas microalgas fossem disponibilizados para as plantas, o processo de mineralização da matéria orgânica (transformação de substâncias orgânicas em inorgânicas) precisou acontecer. Além disso, a RAS do biofertilizante de microalgas e da ARB indicou grau de restrição ligeiro a moderado de salinização e, conseqüente, disponibilidade de água para a cultura (AYERS; WESTCOT (1991). Portanto, esse pode também ter sido um dos fatores que influenciou o desenvolvimento das plantas de rúcula dos tratamentos T2 e T3. Estudos futuros devem ser realizados para comprovar que esse efeito pode ser um fator limitante de crescimento para rúcula.

Em pesquisa que testou a aplicação de duas quantidades de biofertilizante (50 g e 100 g) de *Acutodesmus dimorphus*, aplicadas em dois tempos para o cultivo do tomate Roma (*Solanum lycopersicum* var. Roma) foi identificado que, a aplicação do biofertilizante 22 dias antes do transplante das plantas, melhora o crescimento de plantas, incluindo um maior número de ramos e flores, em comparação com o tratamento controle (sem biofertilizante) e com os tratamentos que receberam biofertilizante no momento do transplante. Isto mostra que a biomassa precisa ser decomposta para ser prontamente disponível para a absorção da planta (GARCIA-GONZALEZ; SOMMERFELD, 2016). Corroborando com tais resultados, LORENTZ et al. (2020) observaram um maior conteúdo de cinzas de *Uruchloa brizantha* cv. Marandu fertilizados com químicos em comparação com o biofertilizante de biomassa de microalgas e atribuíram esse resultado a probabilidade de os minerais presentes no fertilizante químico estarem mais prontamente disponíveis para plantas. Isso demonstra que o tempo de aplicação do biofertilizante de microalgas deve ser amplamente estudado para garantir os benefícios desse bioproduto (DAGNAISSER et al., 2022). Além disso, pesquisas indicam que o uso exclusivo de biofertilizantes de microalgas ainda não é economicamente viável e seus resultados mostram que o custo-benefício é maior com a mistura de biofertilizantes de microalgas com fertilizante químico, mineral ou sintético (SILAMBARASAN et al., 2021; NAYAK; SWAIN; SEN, 2019).

No experimento realizado por SADAK TURHAN et al. (2022) e já citado anteriormente, a microalga foi aplicada em dois momentos do cultivo (1 – 100 mL vaso⁻¹; 2 – 150 mL vaso⁻¹) que recebeu ainda 0%, 50% e 100% da quantidade de NPK como fertilização base e mais uma aplicação de ureia (40 mg N kg⁻¹) após a emergência das plantas. É possível perceber diversas diferenças entre os métodos de cultivo do artigo citado e do presente trabalho. Diferenças essas que podem ter influenciado o desempenho inferior do biofertilizante de microalgas para algumas características morfológicas frente ao fertilizante convencional como, por exemplo, o volume/lâmina de biofertilizante de microalgas aplicado. A rúcula não é uma hortaliça que tolera alta umidade no solo (AGUIAR et al., 2014). Também por isso, pode não ter se adaptado bem a fertirrigação com ARB e biofertilizante de microalgas, se desenvolvendo melhor com adubação nitrogenada de ureia, mesmo com lâmina de irrigação (água do sistema de distribuição do município) semelhante ao volume de biofertilizante aplicado. O biofertilizante e a ARB podem ainda ter proporcionado maior retenção de umidade no solo devido a presença de sólidos em suspensão que, quando depositados no solo de característica argilosa e densidade elevada, formaram um tipo de biofilme. Esse biofilme pode ter reduzido a evaporação de água, mantendo os solos desses tratamentos úmidos por mais tempo. Segundo ALVAREZ et al. (2021) a função dos biofilmes de microalgas na fertilidade do solo, estrutura do solo e crescimento culturas é um tema relevante a ser estudado em pesquisas futuras. Entende-se ainda que o momento de aplicação para cada cultura e a mineralização da biomassa de microalgas para estar disponível para a absorção pelas plantas também são conhecimentos indispensáveis para alcançar os benefícios desse bioproduto para a agricultura e o meio ambiente.

4.1.1.1 Incidência de pragas

Durante a produção da rúcula desta pesquisa, houve infestação por pulgões. O pulgão é uma das principais pragas que afetam a rúcula (AGUIAR et al., 2014). O controle foi feito, principalmente, com a procura e catação manual diária. Além disso, foi realizado biocontrole para pragas com *Cladosporium* sp. nas primeiras duas semanas do cultivo e com DiPel na 2ª semana do cultivo, conforme orientação da responsável técnica pela produção de plantas orgânicas da Fazendinha Agroecológica Km 47.



Figura 21. Registro de pulgões nas folhas de rúcula.

Propriedades biocidas de microalgas em patógenos e pragas de culturas agrícolas como, por exemplo, cebola, tomate e algodão já foram retratadas por diversos estudos (ALVAREZ et al., 2021; ABDEL-HAFEZ; ABO-ELYOUSR; ABDEL-RAHIM, 2015; PRASANNA et al., 2013; ABDEL-RAHIM; HAMED, 2013). Porém, de acordo com o teste F, as médias de ocorrência de pulgões por vaso dos tratamentos não podem ser consideradas diferentes (Figura 22). Portanto, nenhum tratamento apresentou mais resistência ao ataque de pulgões.

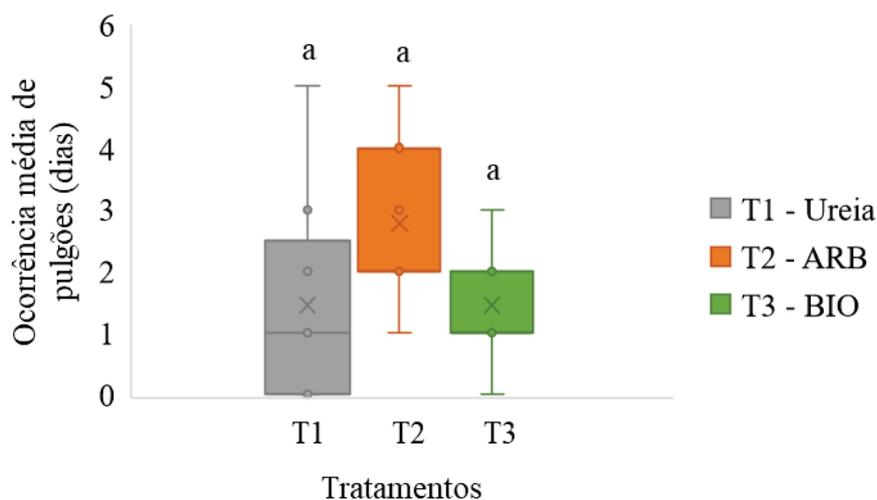


Figura 22. Ocorrência de pulgões por vaso por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).

Apesar de nenhum tratamento se sobressair estatisticamente na resistência aos pulgões, quando observado a sua presença por vaso ao longo do cultivo, é possível perceber que a infestação não foi uniforme (Figura 23). O T1 começou a sofrer ataques na terceira semana após o transplantio. Já os tratamentos T2 e T3 apresentaram pulgões no primeiro dia após a

transferência das plantas para os vasos. Como o registro foi baseado na busca visual e os pulgões são pequenos, estudos mais detalhados e com melhores ferramentas (ex.: lupa) são necessários para confirmar as tendências registradas nesta pesquisa.

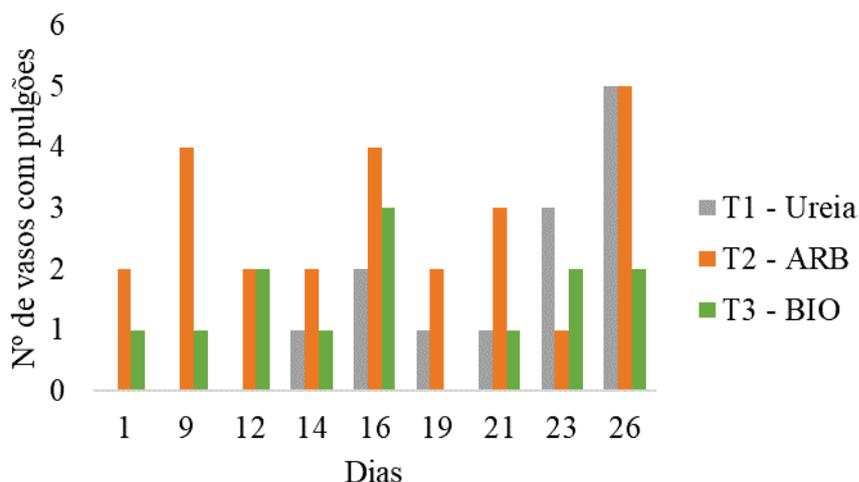


Figura 23. Ocorrência de pulgões por vaso ao longo do cultivo nos diferentes tratamentos.

4.1.2 Análise química das folhas de rúcula

No presente estudo, o tratamento T1 foi superior no quesito concentração de nitrogênio nas folhas (Figura 24). Diferentemente deste trabalho, COPPENS et al. (2016) obteve maior concentração de N nas folhas de tomate que receberam biofertilizante de microalgas (*Nannochloropsis oculata*) em comparação com o tratamento com fertilizante inorgânico convencional. Já LOPES et al. (2023) não identificaram diferença estatística no conteúdo de N das sementes de feijão com ou sem aplicação de biofertilizante de microalgas (*Desmodemus abundans* L2B Bold). Devido à alta correlação entre o conteúdo de nitrogênio e o teor de proteína nas plantas, a concentração de N é usada para estimar o conteúdo proteico nas folhas das plantas (MATOS; MATOS, 2017). Portanto, a fertilização com ureia é a mais indicada quando o objetivo é otimizar o teor de proteína nas folhas de rúcula.

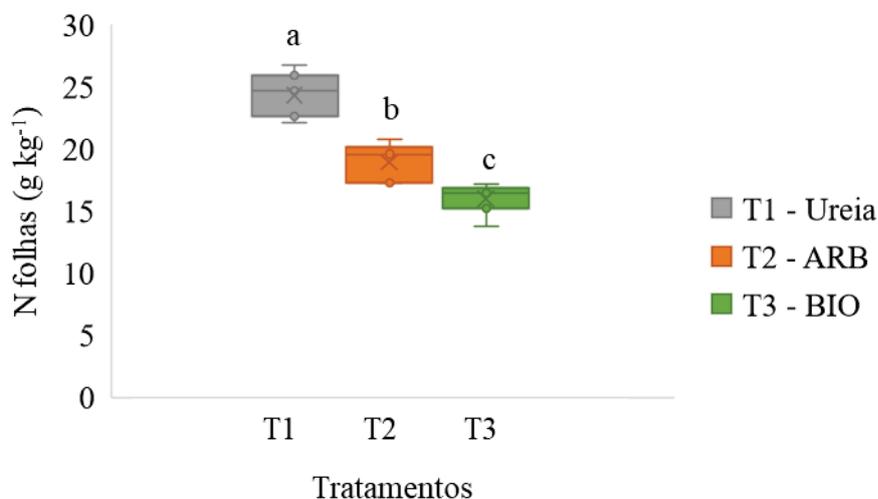


Figura 24. Teor de N nas folhas de rúcula por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).

A análise química das folhas de rúcula teve resultado ambíguo para a concentração de K^+ , pois T2 obteve concentração maior do que T1 e similar ao T3, que por sua vez foi também similar ao T1. Ou seja, apesar de uma singela superioridade de T2, não é possível afirmar que este seja realmente o melhor tratamento se o foco é otimizar a concentração de K^+ nas folhas de rúcula. Um experimento com tomate comparando o uso de fertilizante inorgânico convencional e biofertilizante de microalgas também não apresentou diferença estatística na concentração de K nas folhas das plantas (COPPENS et al., 2016). Por outro lado, SADAK TURHAN et al. (2022) identificaram aumento no conteúdo de K de rúcula (*E. vesicaria* ssp. sativa Mill.) cultivada com aplicação de microalga do gênero *Chlorella* sp. em comparação com aquelas que não receberam as microalgas durante seu cultivo.

Em estudo com cenoura, a análise química da parte aérea também não apresentou diferença estatística na concentração de K naquelas que receberam fertirrigação com ARB tratada para suplementar 0 e 100 da dose de referência de 150 kg N ha^{-1} (JORGE et al., 2022). Todavia, testando duas formulações de biofertilizantes de microalgas (MC1: microalgas unicelulares das espécies *Chlorella* spp., *Scenedesmus* spp., *Chlorococcum* spp., *Chroococcus* spp.; MC2: microalgas filamentosas das espécies *Phormidium* spp., *Anabaena* spp., *Westiellopsis* spp., *Fischerella* spp., *Spirogyra* spp.), RENUKA et al. (2016) concluíram que ambas as formulações proporcionaram ganho significativo de N, P e K na parte aérea, raízes e grãos de trigo. Aumento nas concentrações de K e Ca nas sementes de feijão fertilizado com biofertilizante de microalga da espécie *Desmodium abundans* L2B Bold foi identificado por LOPES et al. (2023), demonstrando o potencial do biofertilizante para a cultura do feijão.

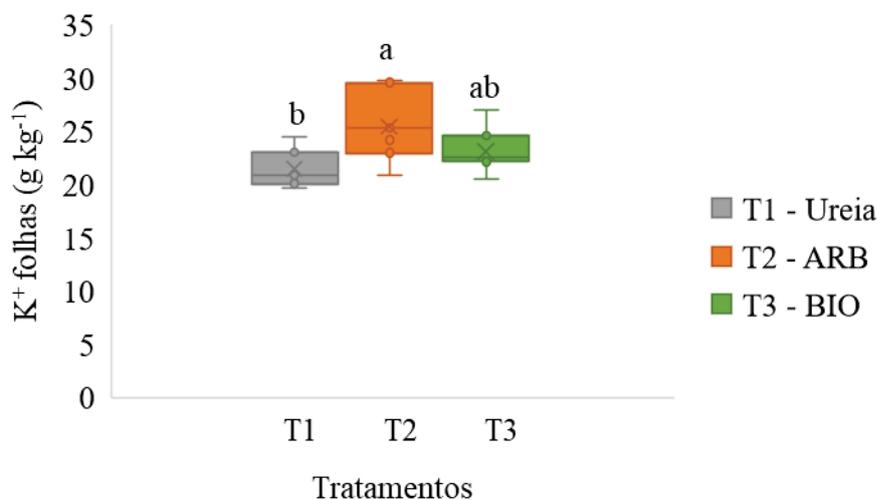


Figura 25. Teor de K nas folhas de rúcula por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).

A concentração de Na, elemento com potencial tóxico para plantas, também foi maior nas folhas de rúcula dos vasos do tratamento T1 e não apresentou diferença entre as plantas que receberam os tratamentos T2 e T3. Assim como a comparação entre T1 e T3 deste estudo, KIM et al. (2018) identificaram que as folhas de espinafre que receberam tratamento com a microalga *Chlorella fusca* registraram menores concentrações de Na do que aquelas que não receberam o tratamento. Similar a este estudo, a aplicação de *C. vulgaris* Beyerinck (Beijerinck) em *E. vesicaria* ssp. sativa Mill. causou uma diminuição significativa no conteúdo de Na (em média 35% a menos) nas plantas (SADAK TURHAN et al., 2022).

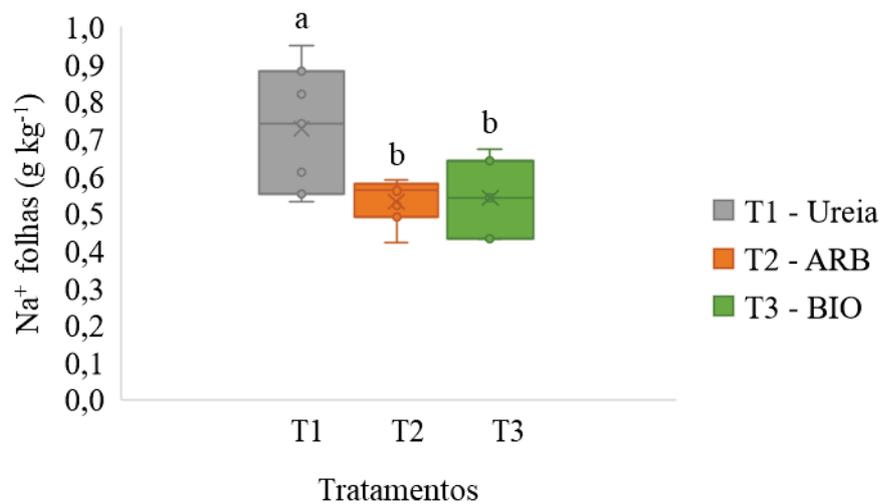


Figura 26. Teor de Na nas folhas de rúcula por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).

4.1.3 Análise microbiológica das folhas de rúcula

Todos os tratamentos tiveram ausência de formação de gases nos tubos de Durham, portanto, apresentaram resultado negativo para a presença de coliformes termotolerantes (Figura 27). Esse resultado é especialmente interessante para agregar conhecimento ao uso de ARB e do biofertilizante de microalgas, produzido na biorremediação da ARB, na produção de alimentos que passarão por mínimo processamento pré-consumo.



Figura 27. Tubos de ensaio da análise microbiológica das folhas de rúcula.

De acordo com o Regulamento Técnico sobre padrões microbiológicos para alimentos (RDC N° 12/2001) da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), o valor tolerado de coliformes termotolerantes por amostra de hortaliças é até 10^2 g⁻¹ (iniciativa). Segundo a IN N°60/2019, que estabelece as listas de padrões microbiológicos para alimentos, as hortaliças "in natura" podem apresentar até 10^2 de *Escherichia coli*/g (coliforme termotolerante) para serem consideradas como satisfatório ou com "qualidade aceitável". Logo, a rúcula produzida estaria com qualidade aceitável para consumo. Assim como neste estudo, JORGE et al. (2022) não identificaram a presença de coliformes termotolerantes em amostras de cenoura

fertirrigadas com ARB tratada. Em pesquisa com beterraba e cenoura irrigadas com água residuária de esgoto doméstico tratada em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), também não foi identificada a presença de coliformes termotolerantes (DANTAS, 2020).

4.2 Análise do Solo

4.2.1 Caracterização química do solo após o cultivo

O solo que recebeu os três tratamentos desta pesquisa não apresentou, após o experimento com rúcula, os mesmos parâmetros que continha quando coletado em seu local de origem, como já era esperado. Os efeitos de cada tratamento são resumidos na

Tabela 8. A comparação estatística das características do solo após os tratamentos é detalhada em seguida.

Tabela 8. Valores médios da caracterização física e análise química da fertilidade do solo após o experimento com rúcula

Trat.	ANÁLISE QUÍMICA											
	Ca	Mg	H+Al	Al	S	T	P	Na	K	V	pH	
	cmol _c kg ⁻¹							mg kg ⁻¹			%	água
T1	2,14 (0,58)	3,40 (0,67)	0,79 (0,14)	0	5,66 (0,68)	6,45 (0,57)	26,19 (8,80)	20,60 (2,07)	9,60 (1,52)	87,52 (3,40)	6,65 (0,09)	
T2	2,72 (0,39)	3,85 (1,01)	0,61 (0,09)	0	7,26 (0,81)	7,87 (0,76)	146,74 (62,89)	43,99 (4,95)	194,97 (27,53)	92,15 (1,55)	7,15 (0,15)	
T3	2,62 (0,30)	3,91 (0,66)	0,63 (0,12)	0	7,04 (0,62)	7,67 (0,52)	94,97 (40,63)	46,79 (12,79)	120,38 (20,57)	91,62 (2,19)	7,16 (0,16)	

Legenda: Na - Sódio; Ca - Cálcio; Mg - Magnésio; K - Potássio; H+Al - Acidez potencial; Al - Alumínio; S - Soma de bases trocáveis; T - Capacidade de troca de cátions; V - Percentagem de saturação por bases; Trat. – Tratamento; Valores entre parênteses indicam o desvio padrão da média.

O pH do solo aumentou em todos os tratamentos e foi significativamente maior nos tratamentos com ARB e biofertilizante (Figura 28). O aumento do pH no solo pode ser atribuído a fatores como, por exemplo, o pH básico da ARB (pH=8) e do biofertilizante de microalga (pH=9) e o aumento da concentração de cátions trocáveis (ex.: Ca²⁺ e Mg²⁺) pela aplicação da ARB e biofertilizante ao solo (ERTHAL et al., 2010). Resultados de um estudo com uso de biofertilizante de cianobactérias em solos do tipo ácido, calcáreo, salino, vermelho e neutro mostrou que uma população de cianobactérias mais elevada está associada a um pH mais alto do solo (HASHEM, 2001).

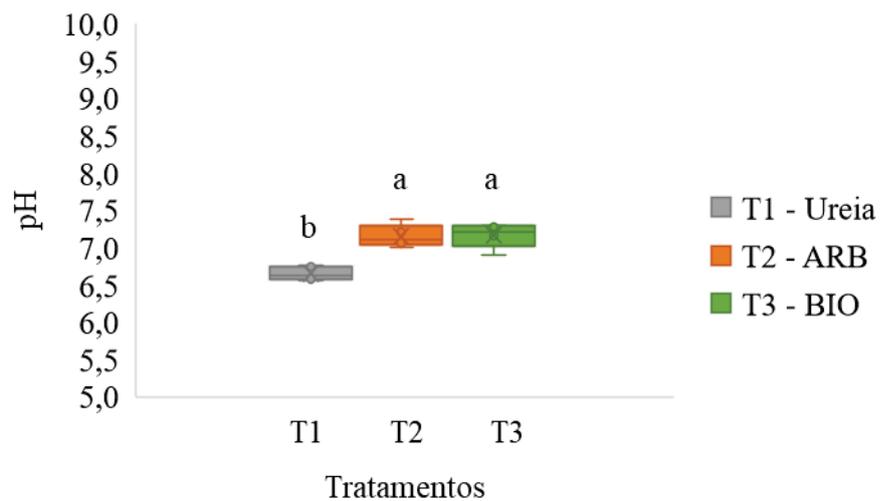


Figura 28. pH do solo por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).

As médias de Ca^{2+} , Mg^{2+} e $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ no solo não apresentaram diferença estatística entre os tratamentos (Figura 29 e Figura 30..). Em geral, o solo após os tratamentos apresentou concentrações mais altas do que as iniciais de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$. O incremento foi de aproximadamente $1,5 \text{ cmol}_c\text{kg}^{-1}$, $2,6 \text{ cmol}_c\text{kg}^{-1}$ e $2,5 \text{ cmol}_c\text{kg}^{-1}$ em T1, T2 e T3, respectivamente.

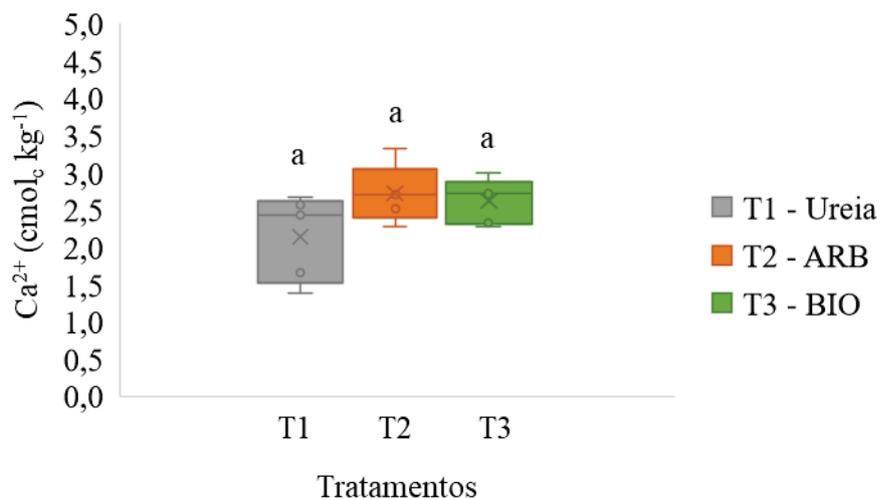


Figura 29. Teor de Ca^{2+} no solo por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).

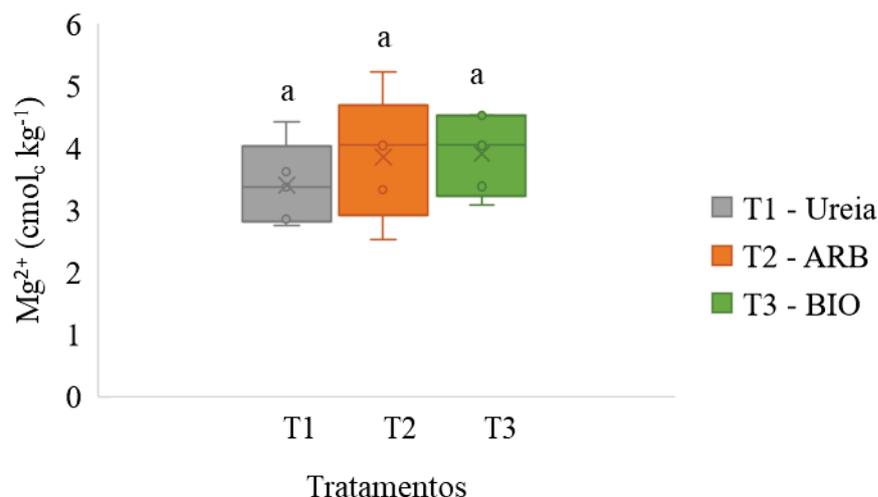


Figura 30. Teor de Mg^{2+} no solo por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).

O teor de sódio no solo dobrou no T1 e aumentou em torno de 4 vezes no T2 e no T3 em comparação ao teor inicial desse elemento químico. De acordo com o teste t, as médias de T2 e T3 foram semelhantes entre si e maiores do que a média de T1 (Figura 31). Elevadas concentrações de Na^+ na solução do solo, em comparação com os cátions trocáveis Ca^{2+} e o Mg^{2+} , podem ocasionar a deterioração da estrutura do solo, devido a separação dos colóides e entupimento dos macroporos, reduzindo a permeabilidade do solo à água e aos gases (ERTHAL et al., 2010). Aumento significativo na concentração de sódio após irrigação com água residuária de esgoto doméstico também foi notado por LEAL et al. (2009).

Altas concentrações de sódio no solo estão associadas a menor proteção do solo e a toxicidade para as plantas. Portanto, esse representativo aumento é um enorme desafio quando se busca a viabilidade e segurança do uso de ARB e biofertilizante de microalgas com características químicas semelhantes as deste estudo no solo. O monitoramento do Na no solo, águas residuárias, planta, ambiente e, do biofertilizante de microalgas produzido na biorremediação de ARB, requer o mesmo nível de importância do nitrato (BOND, 1998 apud FONSECA et al., 2007;). AYERS & WESTCOT (1991) afirmam que a limitação principal do uso de águas residuárias na agricultura é a sua composição química, totais de sais dissolvidos, presença de íons tóxicos e a concentração relativa de sódio. Mais pesquisas são necessárias em casa de vegetação e em experimentos de campo para avaliar a produtividade da rúcula e o efeito residual da aplicação do biofertilizante de microalgas no solo.

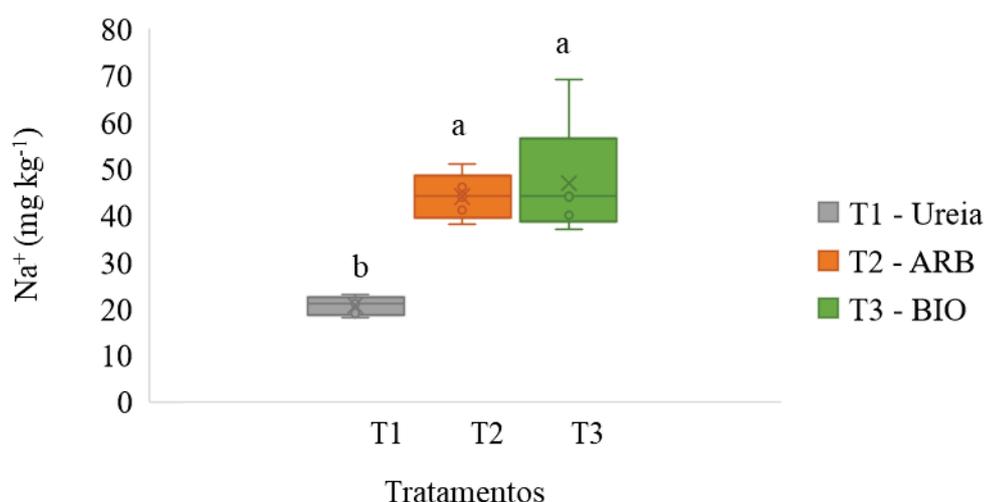


Figura 31. Teor de Na⁺ no solo por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).

A concentração de K⁺ nos solos dos vasos que receberam ARB foi 50 vezes maior do que a inicial e estatisticamente superior a concentração nos solos dos vasos que receberam os tratamentos T1 e T3. O tratamento com biofertilizante aumentou em 31 vezes a concentração inicial de K⁺ no solo, enquanto o tratamento com ureia dobrou a concentração. Segundo a classificação de RODRIGUES FREIRE et al. (2013) para o estado do Rio de Janeiro, as concentrações de K encontradas em T1, T2 e T3 são “baixo”, “muito alto” e “alto”, respectivamente.

De acordo com ERTHAL et al. (2010), o registro do incremento de K trocável no solo é forte indicativo de que as concentrações deste cátion devem ser monitoradas e utilizadas como referência na definição de doses a serem aplicadas de ARB e do biofertilizante de microalgas. Tratamentos com biofertilizantes de microalgas unicelulares e filamentosas (MC1 e MC2, respectivamente) também aumentaram significativamente a concentração de K no solo em comparação com tratamento convencional (dose recomendada de N:P:K) em análise no estágio de colheita de trigo (RENUKA et al, 2016). Já MANCINO & PEPPER (1992), identificaram que em longo prazo a irrigação com águas residuárias causou um decréscimo na concentração de K contida originalmente no solo, provavelmente, devido a lixiviação. Conforme evidenciado no Capítulo I desta pesquisa, de acordo com a RAS, o biofertilizante de microalgas produzido não apresenta grau de restrição para uso no solo. Porém, a segurança de sua aplicação em longo prazo não é garantida devido aos elevados níveis de Na⁺ e K⁺ encontrados no solo após receber este tratamento.

Diferente do N, P e S, o K não participa de combinações orgânicas, sendo, por isso, prontamente liberado no solo quando resíduos orgânicos são incorporados. O acúmulo de K⁺ e Na⁺ no solo pode causar desbalanço de nutrientes no solo, provocando efeitos tóxicos, competição na absorção pelas plantas, como é o caso do sintoma de deficiência de Mg nas plantas que ocorre quando há excesso de potássio no solo (MATOS; MATOS, 2017). Quando o K não é adequadamente lixiviado pode haver problemas de salinização do solo. Solos com alta CTC, tendem a ter menor lixiviação de K, uma vez que este cátion fica adsorvido às cargas negativas do solo (LO MONACO et al., 2009).

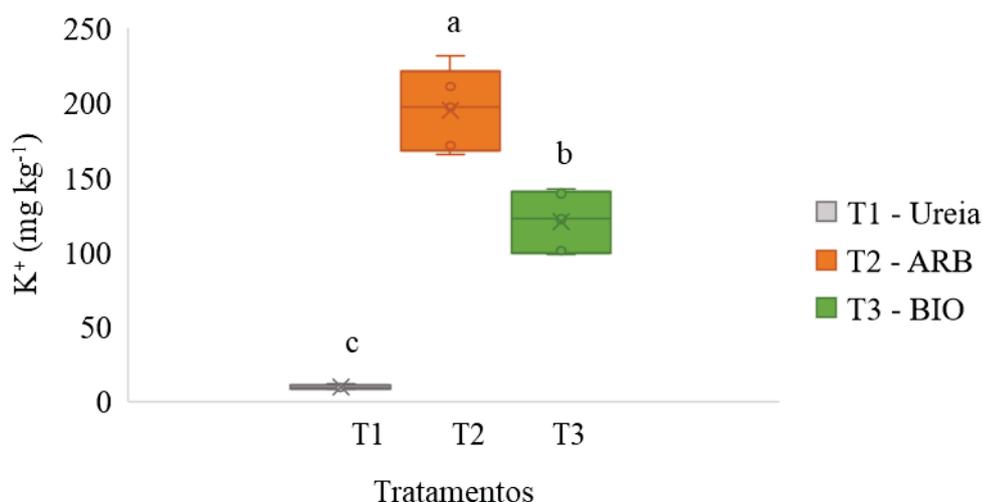


Figura 32. Teor de K⁺ no solo por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).

As concentrações médias de P nos solos fertirrigados com ARB e biofertilizante de microalgas foram maiores do que a encontrada nos solos do T1. Segundo a classificação de RODRIGUES FREIRE et al. (2013) para o estado do Rio de Janeiro, as concentrações de P encontradas em T1, T2 e T3 são “alto”, “muito alto” e “muito alto”, respectivamente. Adicionando biofertilizante de cianobactérias em diversos tipos de solo, HASHEM (2001) encontrou resultados que indicam que uma maior população de cianobactérias no solo associa-se com maior conteúdo de P disponível. Concentrações de P significativamente maiores do que em solos adubados com fertilizante convencional (N:P:K) também foram registradas em tratamentos com biofertilizantes de microalgas para produção de trigo (RENUKA et al., 2016).

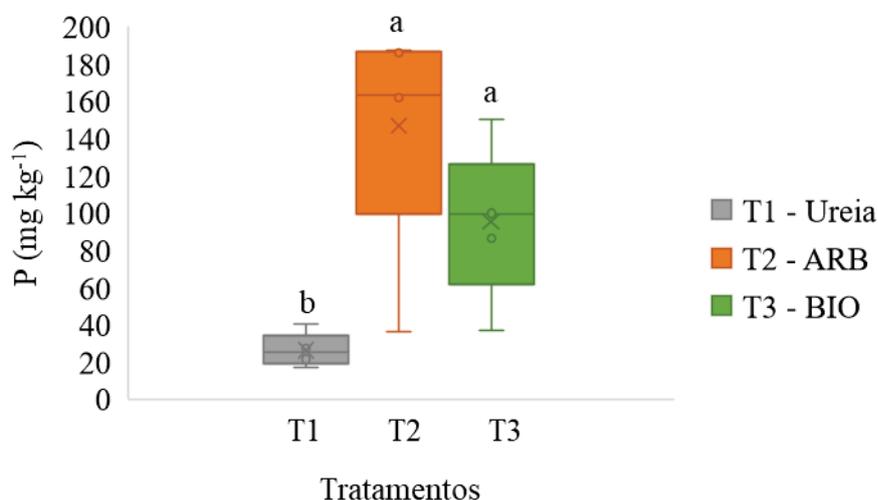


Figura 33. Teor de P disponível no solo por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,01$).

A acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$) reduziu para menos da metade da presente originalmente no solo. Esse resultado era esperado se considerado o aumento do pH e o aporte de cálcio e magnésio, elementos químicos usualmente presentes em corretivos do solo utilizados na calagem. Óxidos de Ca e Mg, por exemplo, reagem instantaneamente com a água, passando a hidróxidos (bases) que agem na redução da acidez dos solos (BAMBOLIM et al., 2015; RODRIGUES FREIRE et al., 2013; NATALE et al., 2012). FORTES NETO et al. (2013) verificaram relação entre o aumento do pH em solo com fertirrigação com água residuária, também identificado neste estudo, com a diminuição da $H^+ + Al$ se comparado com o tratamento

controle (sem adição de água residuária). O autor ainda atribui a correção da acidez potencial à insolubilização do Al^{3+} e neutralização do H^+ . Os valores médios encontrados para T1, T2 e T3 foram $0,79 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ($\pm 0,14$), $0,61 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ($\pm 0,09$), $0,63 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ($\pm 0,12$), respectivamente, de acordo com o teste F, tais médias de $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ encontradas nos solos dos três tratamentos não podem ser consideradas diferentes (Figura 34).

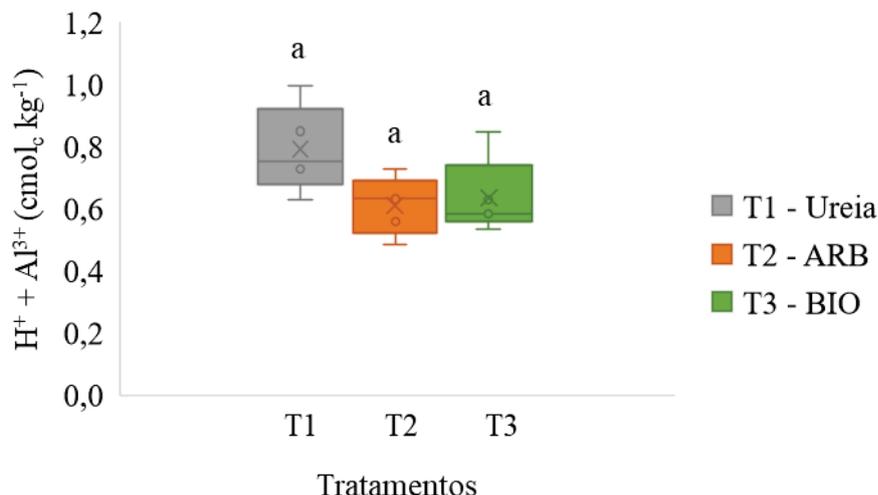


Figura 34. Teor de $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ no solo por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).

Os somatórios dos teores das bases cálcio, magnésio, potássio e sódio (valor S) dos solos que receberam ARB e biofertilizante foram semelhantes entre si e superiores ao solo que recebeu o tratamento controle com fertilizante convencional ureia como fonte de N (Figura 35). Uma das propriedades químicas mais importantes dos solos é a CTC, pois reflete a capacidade de retenção de cátions nutrientes das plantas (ex.: Ca, Mg, K) que ficam adsorvidos nos sítios de carga negativa dos colóides minerais e orgânicos do solo (MATOS; MATOS, 2017). A CTC, assim como o valor S, foi maior no T2 e T3 do que no T1 (Figura 36).

A ANOVA do valor V, ou percentagem de saturação por bases, foi significativa. Porém, o teste de Tukey não garantiu a diferença estatística de um tratamento perante os outros devido a ambiguidade do resultado. O tratamento T2 registrou maior concentração se comparado com T1, entretanto, T3 foi semelhante ao T1 e ao T2 (Figura 37). Ou seja, existe uma tendência a diferenciação, porém ainda não estabelecida estatisticamente. As médias de valor V dos tratamentos T1, T2 e T3 foram 87,52% ($\pm 3,4$), 92,15% ($\pm 1,55$) e 91,62% ($\pm 2,19$), respectivamente. O incremento da CTC e do valor V (%) em solos com adição de águas residuárias resultam das altas concentrações de íons e dos colóides orgânicos usualmente presentes nesses efluentes (ERTHAL et al., 2010).

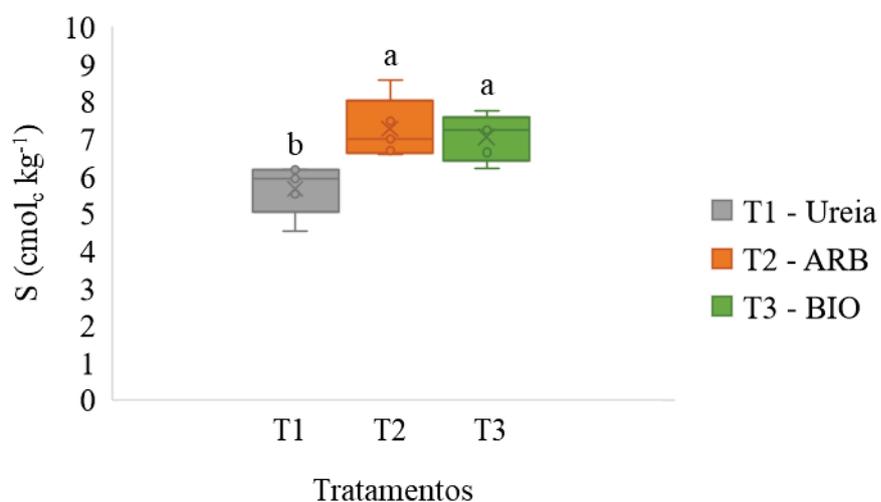


Figura 35. Soma de bases trocáveis no solo por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).

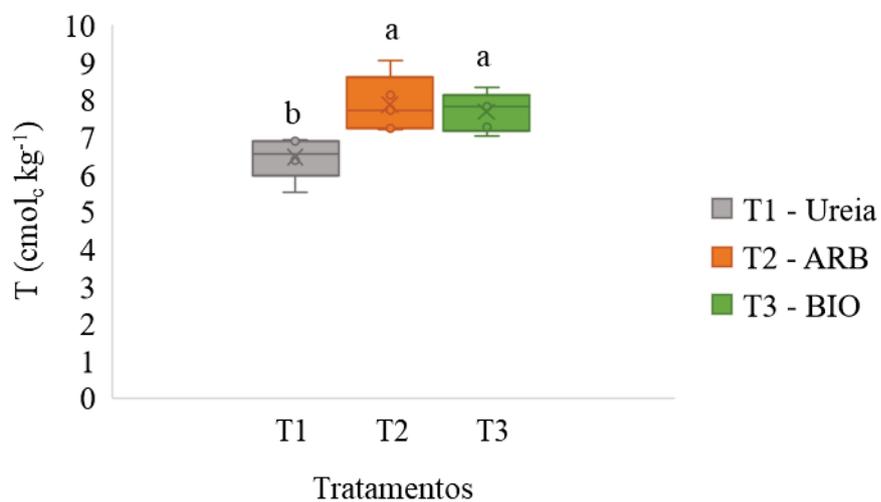


Figura 36. Capacidade de troca de cátions no solo por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).

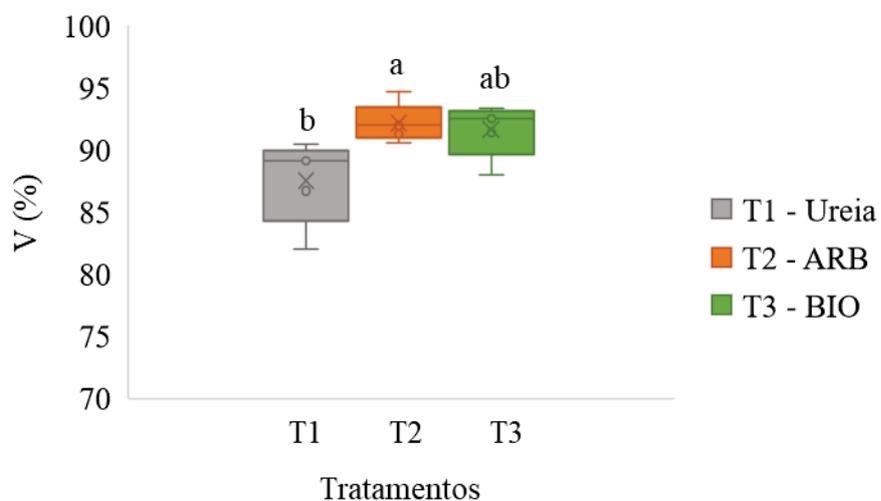


Figura 37. Percentagem de saturação por bases no solo por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).

Considerando o elevado valor V (%) nas amostras de terra após o experimento, a percentagem de saturação por sódio (PSS) foi calculada para indicar a proporção de sódio em

relação a CTC total. O solo, antes do experimento, tinha PSS de 0,78 e as médias de PSS para T1, T2 e T3 foram 1,39 ($\pm 0,06$), 2,44 ($\pm 0,28$) e 2,65 ($\pm 0,65$), respectivamente. Tais resultados representam 22%, 31% e 34% do valor T (Ca + Mg + K + Na + H + Al). Analisar a quantidade de sódio no solo é importante pois, além da problemática da salinização, quando um solo possui alto valor V (%) ao mesmo tempo em que apresenta altos teores de sódio e/ou salino, a saturação por base não indica alta fertilidade devido ao teor elevado de sódio e/ou altos teores de sais solúveis (SANTOS et al., 2018).

Em experimento com adição de ARB em diferentes doses, os valores de pH, CTC, V (%) e concentrações de Ca, Mg, P e K também aumentaram (ERTHAL et al., 2010). Já se sabe que os dejetos de animais são comumente reciclados como fertilizantes, entretanto, é necessário dar atenção aos possíveis impactos ambientais desta prática (BOSCH-SERRA et al., 2020). As principais alterações identificadas em solos fertirrigados com águas residuárias se resumem ao carbono e nitrogênio total no solo, nitrogênio mineral na solução do solo, atividade de microrganismos, cálcio e magnésio trocáveis, salinidade, sodicidade, condutividade hidráulica e dispersão de argilas (FONSECA et al., 2007). Os íons geralmente associados a problemas de salinidade no solo são Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , CO_3^{2-} e HCO_3^- (MATOS; MATOS, 2017). Portanto, o uso de águas residuárias na agricultura deve ser planejado para controlar, em longo prazo, os efeitos da salinidade e sodicidade sobre os solos e as culturas (AYERS; WESTCOT, 1991).

4.2.2 Caracterização da estrutura do solo após o experimento

A forma dos agregados das amostras dos três tratamentos foi de blocos (angulares e subangulares). O tamanho médio das estruturas e a faixa de GDE identificadas nas amostras de cada tratamento são apresentados na Tabela 9. Os três tratamentos tiveram o tamanho médio dos seus agregados na classe entre 1 e 4 cm.

Tabela 9. Faixa de GDE e o tamanho médio dos agregados por tratamento

Tratamento	Tamanho médio dos agregados (cm)	GDE
T1 - Ureia	2,3 ($\pm 0,6$)	Fraco à Médio
T2 - ARB	3,0 ($\pm 0,4$)	Médio à Forte
T3 - BIO	3,2 ($\pm 0,4$)	Forte

Valores entre parênteses indicam o desvio padrão da média.

Considerando o tamanho médio dos agregados por tratamento e a proporção relativa da classe à qual tais agregados se enquadram, foram atribuídas as notas de qualidade estrutural descritas na Tabela 10. A proporção relativa dos agregados de maior tamanho para T1 foi menor do que 50% e para T3 foi maior do que 70%. T2 teve 4 amostras com agregados entre 1 a 4 cm representando 70% ou mais do seu conteúdo e uma amostra com proporção aparente entre 50 e 70% do solo com agregados dessa faixa de tamanho. T1 apresentou agregados com menos de 1 cm nas 5 amostras em proporção acima de 70%. Ou seja, o solo de T1 estava visualmente mais solto e com menos agregados do que os solos dos tratamentos T2 e T3 (Figura 38).

Segundo RALISCH et al. (2017), solos desagregados e com agregados menores do que 1 cm, exceto em caso de camada livre superficial e horizonte B de Latossolos, indica inadequada qualidade estrutural do solo. Além disso, favorece a exposição, oxidação e perda da matéria orgânica e confere maior suscetibilidade a processos erosivos. A avaliação indica que o biofertilizante de microalgas, bem como a ARB, pode agir como condicionador do solo, melhorando sua qualidade estrutural se comparado com o solo adubado com fertilizante nitrogenado convencional (ureia).

Um fator que também pode contribuir para a melhora na estrutura, agregação e estabilização do solo é a possível liberação de polissacarídeos extracelulares (EPS) pelas microalgas no solo, funcionando como um agente cimentante que ajuda a agregar as partículas do solo (GUO et al., 2020). A *Spirulina* (*A. platensis*), espécie utilizada no presente estudo, produz EPS (RACHIDI et al., 2020). De acordo com MAGER & THOMAS (2011), essa camada de polissacarídeos ajuda a formar agregados compostos por microrganismos (ex.: cianobactérias) e partículas do solo que diminuem a perda de C por erosão.

Tabela 10. Proporção relativa de agregados (%) na amostra e a nota da qualidade estrutural

Tratamento	Proporção relativa (%)	(Qec)
T1 - Ureia	<50	4/2/1
	<50	4/2/1
	<50	4/2/1
	<50	4/2/1
	<50	4/2/1
T2 - ARB	>70	6/3
	>70	6/3
	>70	6/3
	50-70	5/3/2
	>70	6/3
T3 - BIO	>70	6/3
	>70	6/3
	>70	6/3
	>70	6/3
	>70	6/3



A



B



C

Figura 38. Amostras do solo por tratamento. A: T1; B: T2; C: T3.

Os agregados com tamanho entre 1 e 4 cm são considerados pelo DRES como parâmetro norteador de estrutura ideal do solo. Entende-se que os agregados desta classe, em conjunto ao

aspecto grumoso, com presença de alta atividade biológica e porosidade visível, permitem ao solo exercer adequadamente suas funções, potencializando sua fertilidade e a produtividade das culturas (RALISCH et al., 2017). O resultado da ANOVA mostrou que o tamanho dos agregados dos solos que receberam ARB (T2) e biofertilizante de microalgas (T3) foram semelhantes entre si e superiores ao tratamento controle com ureia (T1) (Figura 39).

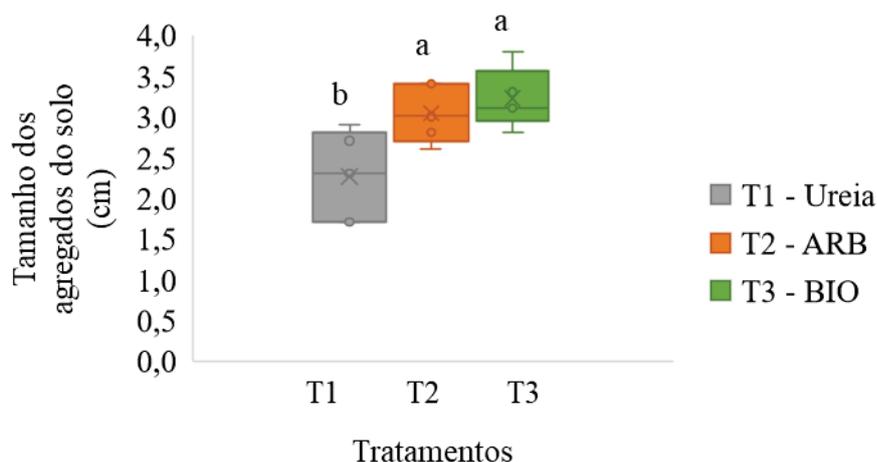


Figura 39. Tamanho dos agregados do solo por tratamento (Tukey, p -value $\leq 0,05$).

Para qualificação conforme o método DRES, devem ser considerados também as evidências de conservação/recuperação ou degradação da camada de solo, com o auxílio de informações complementares obtidas da análise da amostra como um todo e das características do entorno. Como o experimento do presente trabalho foi realizado em vasos com o mesmo solo sob diferentes tratamentos, estas avaliações não foram realizadas.

Ainda, é fundamental destacar que, a recuperação da qualidade estrutural de solos degradados ($Q_{e3}=3$ ou 2) tem estimativa de ocorrência entre 2 e 4 anos após adoção de práticas de manejo mais sustentáveis como, por exemplo, aumento da diversidade de espécies vegetais com alta produção de fitomassa da parte aérea e raízes (RALISCH et al., 2017). Um experimento laboratorial de 90 dias de duração também identificou melhoria na estabilidade dos agregados em solos que receberam microalgas (*Phormidium ambiguum* e *Scytonema javanicum*) (CHAMIZO et al., 2018). A acelerada diferenciação da estrutura do solo que recebeu o biofertilizante perante o solo que recebeu fertilização convencional (ureia) também é um indicador do potencial desse bioproduto como condicionador do solo.

5 CONCLUSÕES

Conclui-se que o biofertilizante de microalgas (T3) pode ser utilizado como fonte de nitrogênio no cultivo de *Eruca vesicaria* (L.) Cav. em substituição a ureia, com qualidade de desenvolvimento das plantas similar segundo IQD, porém com menor produtividade em termos de H, NF, AF e MSPA.

O biofertilizante de biomassa de microalgas proporcionou alguns parâmetros morfológicos (H, NF, DC, AF, CR, MFR, IQD) e químicos (K e Na nas folhas) estatisticamente semelhantes aos das plantas fertilizadas com ARB (T2). Não foram constatadas diferenças estatísticas entre os três tratamentos para os parâmetros CR, MFR e IQD. As plantas produzidas com ureia (T1) tiveram H, NF, DC, AF e MSPA e concentração de N e Na nas folhas superiores às plantas cultivadas com T2 e T3. MSR dos tratamentos T1 e T2 foi estatisticamente superior a T3. Após mínimo processamento, as folhas das rúculas dos três tratamentos apresentaram resultado negativo para a presença de coliformes termotolerantes.

O tamanho dos agregados dos solos de T2 e T3 foram semelhantes entre si e superiores ao tratamento controle T1. A avaliação da estrutura do solo após o experimento indica que o biofertilizante de microalgas, bem como a ARB, pode agir como condicionador do solo, melhorando sua qualidade estrutural se comparado com solo adubado com ureia.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-HAFEZ, S.I.I.; ABO-ELYOUSR, K.A.M.; ABDEL-RAHIM, I.R. Fungicidal activity of extracellular products of cyanobacteria against *Alternaria porri*, Eur. J. Phycol. 50, 239–245, 2015, <https://doi.org/10.1080/09670262.2015.1028105>.

ABDEL-RAHIM, E.F.M.; HAMED, S.M. Efficacy of *Anabaena flos aquae* alga against larvae of the cotton leaf worm, *Spodoptera littoralis* (Boisd.), Egyptian Journal of Biological Pest Control, 23 (1), 1–7, 2013.

AGUIAR, A.T.E.; CHARLESTON GONÇALVES, C.; PATERNIANI; M.E.A.Z.P. et al. 7.^a Ed. rev. e atual. Campinas: Instituto Agronômico, 2014. 452 p. (Boletim IAC, n.º 200), ISSN 0375-1538.

ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., DE MORAES GONÇALVES, J. L., & SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, 22(6), 711–728, 2013. doi:10.1127/0941-2948/2013/0507.

ALVAREZ, A. L.; WEYERS, S. L.; GOEMANN, H. M.; PEYTON, B. M.; GARDNER, R. D. Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture. Algal Research, 54(102200), 2021, ISSN 2211-9264, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102200>.

ARAÚJO, C. S. de; RUFINO, C. P. B.; BEZERRA, J. L. S.; ANDRADE NETO, R. de C.; LUNZ, A. M. P. Crescimento de mudas de açaieiro (*Euterpe oleracea* Mart.) submetidas a diferentes doses de fósforo. South American Journal of Basic Education, Technical and Technological, v. 5, n. 1, p. 102-111, ISSN: 2446-4821, 2018.

ARRUDA, M. H.; AMARAL, L. De L.; PIRES, O. P. J.; BARUFI, C. R. V. Dimensionamento de Biodigestor para Geração de Energia Alternativa. Revista Científica Eletrônica De Agronomia, Garças, ano 1, n. 2, 2002.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W.; tradução de H.R. Gheyi, J.F. de Medeiros, F.A.V. Damasceno. A qualidade da água na agricultura. Campina Grande: UFPb, 1991. 218p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29 Revisado 1).

BAMBOLIM, A.; CAIONE, G.; SOUZA, N. F.; SEBEN-JUNIOR, G. F.; FERBONINK, G. F. Calcário líquido e calcário convencional na correção da acidez do solo. Revista de Agricultura Neotropical, Cassilândia-MS, 2 (3), 34–38, 2015, <https://doi.org/10.32404/rean.v2i3>.

BATISTA, G. dos S.; SILVA, J. L. da; ROCHA, D. N. S.; SOUZA, A. R. E. de; ARAUJO, J. F.; MESQUITA, A. C. CRESCIMENTO INICIAL DO MELOEIRO EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE BIOFERTILIZANTES NO CULTIVO ORGÂNICO. Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável, [S. l.], v. 9, n. 2, 2019. <https://doi.org/10.21206/rbas.v9i2.3072>.

BOND, W.J. Effluent irrigation – an environmental challenge for soil science. Australian Journal of Soil Research, v.36, p.543-555, 1998.

BOSCH-SERRA, A.D.; YAGÜE, M.R.; VALDEZ, A.S.; DOMINGO-OLIVÉ, F. Dairy cattle slurry fertilization management in an intensive Mediterranean agricultural system to sustain

soil quality while enhancing rapeseed nutritional value. *Journal of Environmental Management*, v. 273, 111092, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111092>.

BRAINER, M.S.C.P. Produção de hortaliças na área de atuação do BNB. Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste (ETENE) Caderno Setorial ETENE. Banco do Nordeste. Ano 6, nº180, ago. 2021. 14p.

BRASIL. Ministério da Saúde (MS). Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Instrução Normativa N° 60, de 23 de dezembro de 2019. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF (26 dez. 2019).

CARMO et al. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Unidade Solos. Métodos de análise de tecidos vegetais utilizados na Embrapa Solos / Ciriaca Arcangela Ferreira de Santana do Carmo et al. - Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. Circular Técnica nº 6. ISSN 1517-5146. 41p.

CARVALHAES COUTINHO, L.; KOEFENDER, J.; PRUDENCIO DE MERA, C.; NICOLODI CAMERA, J. Produção de hortaliças orgânicas: estudo de caso em uma propriedade do interior de Ijuí, RS. *Multitemas*, 24(56), 81–96, 2019. <https://doi.org/10.20435/multi.v24i56.1993>.

CHAMIZO, S.; MUGNAI, G.; ROSSI, F.; CERTINI, G.; DE PHILIPPIS, R. Cyanobacteria Inoculation Improves Soil Stability and Fertility on Different Textured Soils: Gaining Insights for Applicability in Soil Restoration. *Front. Environ. Sci.* 6:49, 2018, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00049>.

COPPENS, J.; GRUNERT, O.; VAN DEN HENDE, S.; VANHOUTTE, I., BOON, N.; HAESAERT, G.; GELDER LD. The use of microalgae as a high-value organic slow-release fertilizer results in tomatoes with increased carotenoid and sugar levels. *J Appl Phycol*, 28, 2367–2377, 2016, <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0775-2>.

CURRY, G.N.; NAKE, S.; KOCZBERSKI, G.; OSWALD, M.; RAFFLEGEAU, S.; LUMMANI, J.; PETER, E.; NAILINA, R. Disruptive innovation in agriculture: Socio-cultural factors in technology adoption in the developing world, *Journal of Rural Studies*, Volume 88, 2021, Pages 422-431, ISSN 0743-0167, <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.07.022>.

DAGNAISSER, L.S.; DOS SANTOS, M.G.B.; RITA, A.V.S.; CHAVES CARDOSO, J.; CARVALHO, D.F.; MENDONÇA, H.V. Microalgae as Bio-fertilizer: a New Strategy for Advancing Modern Agriculture, Wastewater Bioremediation, and Atmospheric Carbon Mitigation. *Water Air Soil Pollut* 233, 477, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05917-x>.

DANTAS, I.L.A.; FACCIOLI, G.G.; SANTOS, A.R.R.; ARAÚJO, L.R.S. Capítulo 2: Análise microbiológica de cenoura e beterraba irrigadas com águas residuárias domésticas tratadas. In: SOUSA, I.F.; MONTEIRO, A.S.C.; SANTANA, N.R.F. (Ed.). *Olhar dos recursos e do meio ambiente do Estado de Sergipe*. Belo Horizonte–MG: Poisson, 20-33, 2020. DOI: 10.36229/978-85-7042-208-8.CAP.02

DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. *The Forestry Chronicle*. 36(1): 10-13, 1960. <https://doi.org/10.5558/tfc36010-1>.

DINESHKUMAR, R.; SUBRAMANIAN, J.; GOPALSAMY, J.; JAYASINGAM, P.; ARUMUGAM, A.; KANNADASAN, S.; SAMPATHKUMAR P. The Impact of Using Microalgae as Biofertilizer in Maize (*Zea mays* L). *Waste Biomass Valor*, 10, 1101–1110, 2019, <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0123-7>.

ERTHAL, V.J.T.; FERREIRA, P.A.; MATOS, A.T.; PEREIRA, O.G. Alterações físicas e químicas de um argissolo pela aplicação de água residuária de bovinocultura. *Revista de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n.5, p.467 -477, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000500003>.

FERREIRA, A.; MELKONYAN, L.; CARAPINHA, S.; RIBEIRO, B.; FIGUEIREDO, D.; AVETISOVA, G.; GOUBEIA, L. Biostimulant and biopesticide potential of microalgae growing in piggery wastewater. *Environmental Advances*, Volume 4, 2021, 100062, ISSN 2666-7657, <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100062>.

FERREIRA, A.P.N. Efeito bioestimulante da biomassa de *Chlorella* sp. e seu potencial na produção de mudas de meloeiro. Dissertação (Mestrado em Horticultura Tropical) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, Pombal, 2022. 77f.

FERREIRA, K.N.; ARAÚJO, R.H.C.R.; OLIVEIRA, A.M.F. et al. Cashew Rootstock Production Using *Spirulina platensis* Biomass. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 65, 2022, <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2022220042>.

FONSECA, A. F.; HERPIN, U; PAULA, A. M.; VICTORIA, R. L.; MELFI, A. J. Agricultural use of treated sewage effluents: Agronomic and environmental implications and perspectives for Brazil. *Scientia Agrícola*, v. 64, n.2, p.194-209, 2007, <https://doi.org/10.1590/S0103-90162007000200014>.

FORTES NETO, P.; VEIGA, P.G.A.; FORTES, N.L.P.; TARGA, M.S.; GADIOLI, J.L.; PEIXOTO, P.H.M. Alterações químicas do solo e produção de aveia fertilizada com água residuária do tratamento de esgoto sanitário. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, vol. 8, 2013, 71-83, <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1368>.

GARCIA-GONZALEZ, J.; SOMMERFELD, M. Biofertilizer and biostimulant properties of the microalga *Acutodesmus dimorphus*. *Journal of Applied Phycology*, 28, 1051–1061, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0625-2>.

GARCÍA-ORELLANA, Y.; SOTO, G.; TAFUR, V.; SIMBAÑA, A.; TELLO, E.; BRITO, J.J. Efecto de un fertilizante orgánico microalgal en la germinación y crecimiento de plántulas de albahaca (*Ocimum basilicum* L.). *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología*, 34: 33-39. 2016.

GONZALEZ, A.F.; AYUB, R.A.; REGHIN, M.Y. Conservação de rúcula minimamente processada produzida em campo aberto e cultivo protegido com agrotêxtil. *Horticultura Brasileira* [online], Volume 24, n.3, p.360-362. ISSN 0102-0536, 2006, <https://doi.org/10.1590/S0102-05362006000300018>.

GRANGEIRO, L. C.; OLIVEIRA, F.; NEGREIROS, M.; MARROCOS, S.; LUCENA, R.; OLIVEIRA, R. Crescimento e acúmulo de nutrientes em coentro e rúcula. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, Recife, v. 6, n. 1, p.11–16, 2011.

GUO, S. et al. Microalgae as biofertilizer in modern agriculture. In: ALAM ET AL. (Ed.). *Microalgae Biotechnology for Food, Health and High-Value Products*. 1. ed. [s.l.] Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020. p. 397–411, https://doi.org/10.1007/978-981-15-0169-2_12.

HASHEM, M.A. Problems and prospects of cyanobacterial biofertilizer for rice cultivation. *Aust. J. Plant Physiol.*, 28, 881–888, 2001. <https://doi.org/10.1071/PP01052>.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Sidra. Censo Agropecuário 2017. Tabela 6953. Disponível em:<<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6953>>. Acesso em: 22 dez. 2022.

- JORGE, M. F.; SILVA, L. D. B. da; HÜTHER, C. M.; CECCHIN, D.; MELO, A. C. F. de; FRANCISCO, J. P.; NASCENTES, A. L.; ALVES, D. G.; GUERRA, J. G. M. Potential use of treated wastewater from a cattle operation in the fertigation of organic carrots. *Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)*, Rio de Janeiro, v. 57, n. 4, p. 542–554, 2022. <https://doi.org/10.5327/Z2176-94781385>.
- KIM, M. J., SHIM, C. K., KIM, Y. K., KO, B. G., PARK, J. H., HWANG, S. G.; KIM, B. H. Effect of biostimulator *Chlorella fusca* on improving growth and qualities of Chinese chives and spinach in organic farm. *Plant Pathology Journal*, 34, 567–574, 2018, <https://doi.org/10.5423/PPJ.FT.11.2018.0254>.
- LEAL, R.M.; FIRME, L.P.; MONTES, C.R.; MELFI, A.J.; PIEDADE, S.M. Soil exchangeable cations, sugarcane production and nutrient uptake after wastewater irrigation. *Scientia Agricola*, 66 (2), 242-249, 2009, <https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000200014>.
- LO MONACO, P.A.; MATOS, A. T. de; MARTINEZ, H. E. P.; FERREIRA, P. A.; RAMOS, M. M. Características químicas do solo após a fertirrigação do cafeeiro com águas residuárias da lavagem e descascamento de seus frutos. *IRRIGA*, [S. l.], v. 14, n. 3, p. 348–364, 2009. <https://doi.org/10.15809/irriga.2009v14n3p348-364>.
- LOPES, G.B.; GOELZER, A.; REICHEL, T.; DE RESENDE, M.L.V.; DUARTE, W.F. Potential of *Desmodesmus abundans* as biofertilizer in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.), *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, Volume 49, 2023, 102657, ISSN 1878-8181, <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102657>.
- LORENTZ, J. F., CALIJURI, M. L., ASSEMANY, P. P., ALVES, W. S.; PEREIRA, O. G. Microalgal biomass as a biofertilizer for pasture cultivation: Plant productivity and chemical composition. *Journal of Cleaner Production*, 276, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124130>.
- LOWDER, S.K.; SÁNCHEZ, M.V.; BERTINI, R. Which farms feed the world and has farmland become more concentrated?, *World Development*, Volume 142, 2021, 105455, ISSN 0305-750X, <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105455>.
- MAGER, D.M.; THOMAS, A.D. Extracellular polysaccharides from cyanobacterial soil crusts: a review of their role in dryland soil processes, *Journal of Arid Environments*, Volume 75, Issue 2, 2011, Pages 91-97, ISSN 0140-1963, <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.10.001>.
- MANCINO, C.F.; PEPPER, I.L. Irrigation of turfgrass with secondary sewage effluent: soil quality. *Agronomy Journal*, 84, 650-654, 1992, <https://doi.org/10.2134/agronj1992.00021962008400040023x>.
- MATOS, A.T.; MATOS, M.P. Disposição de águas residuárias no solo e em sistemas alagados construídos. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2017. 371p.
- MATOS, C.F. Produção de biogás e biofertilizante a partir de dejetos de bovinos, sob sistema orgânico e convencional de produção. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, 2016. 52 f.
- NASCIMENTO, C.W.R. Barras de ferro como subsídio o uso do Radar de Penetração no Solo (GPR) com antenas monoestáticas para imageamento de solos. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, 2019. 89f.
- NATALE, W.; ROZANE, D.R.; PARENT, L.E.; PARENT, S. Acidez do solo e calagem em pomares de frutíferas tropicais. *Revista Brasileira de Fruticultura*. 34 (4), 1294-1306 2012, <https://doi.org/10.1590/S0100-29452012000400041>.

- NAYAK, M.; SWAIN, D. K.; SEN, R. Strategic valorization of de-oiled microalgal biomass waste as biofertilizer for sustainable and improved agriculture of rice (*Oryza sativa* L.) crop. *Science of the Total Environment*, 682, 475–484, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.123>.
- PEEL, M.C.; FINLAYSON, B.L.; MCMAHON, T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, v.11, (5), 1633-1644, 2007. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- PRASANNA, R.; CHAUDHARY, V.; GUPTA, V.; BABU, S.; KUMAR, A.; SINGH, R.; SHIVAY, Y.S.; NAIN, L. Cyanobacteria mediated plant growth promotion and bioprotection against Fusarium wilt in tomato, *Eur. J. Plant Pathol.* 136, 337–353, 2013, <https://doi.org/10.1007/s10658-013-0167-x>.
- PUGLISI I.; LA BELLA, E.; ROVETTO, E.I.; LO PIERO, A.R.; BAGLIERI, A. Biostimulant Effect and Biochemical Response in Lettuce Seedlings Treated with A *Scenedesmus quadricauda* Extract. *Plants (Basel)*. 2020 Jan 18;9(1):123. <https://doi.org/10.3390/plants9010123>.
- RACHIDI, F.; BENHIMA, R.; SBABOU, L.; EL ARROUSSI, H. Microalgae polysaccharides bio-stimulating effect on tomato plants: growth and metabolic distribution, *Biotechnology Reports*, Volume 25, 2020, e00426, ISSN 2215-017X, <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00426>.
- RALISCH, R. et al. Documentos 390 Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo-DRES Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Soja Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2017.
- RENUKA, N.; PRASANNA, R.; SOOD, A. et al. Exploring the efficacy of wastewater-grown microalgal biomass as a biofertilizer for wheat. *Environ Sci Pollut Res* 23, 6608–6620, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5884-6>.
- RODRIGUES FREIRE, L. [et al.]. Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro. Brasília, DF: Embrapa; Seropédica, RJ: Editora Universidade Rural, 2013. ISBN: Embrapa 978-85-7035-182-1. ISBN: Editora Universidade Rural 978-85-8067-050-9. 430 p.
- SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. ISBN 978-85-7035-800-4. 356 p.
- SANTOS, A.Y.O.; FREIRE, M.M.; MORAIS, E.G.; MORAIS, E.R.E.; SILVA, G.G.C. Resposta da rúcula em função da adubação potássica. II Congresso Internacional das Ciências Agrárias (COINTER) – PDVAgro 2017. 2017. 5p.
- SANTOS, R.D. et al. Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 5. ed. rev. e ampl. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100p.
- SHEDEED, Z.A.; GHEDA, S.; ELSANADILY, S.; ALHARBI, K.; OSMAN, M.E.H. *Spirulina platensis* Biofertilization for Enhancing Growth, Photosynthetic Capacity and Yield of *Lupinus luteus*. *Agriculture* 2022, 12, 781. <https://doi.org/10.3390/agriculture12060781>
- SIGRIST, J.M.M. Estudos fisiológicos e tecnológicos de couve-flor e rúcula minimamente processadas. Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Piracicaba, 2002. 112 p.

SILAMBARASAN, S.; LOGESWARI, P.; SIVARAMAKRISHNAN, R.; INCHAROENSAKDI, A.; CORNEJO, P.; KAMARAJ, B.; CHI, N. T. L. Removal of nutrients from domestic wastewater by microalgae coupled to lipid augmentation for biodiesel production and influence of deoiled algal biomass as biofertilizer for *Solanum lycopersicum* cultivation. *Chemosphere*, 268, 129323, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129323>.

SILVA, C. B. da; SILVA, J. C. da; OLIVEIRA, F. de A.; BARRETO, J. A. dos S.; SANTOS, D. P. dos; SANTOS, M. A. L. dos. Milho verde em região semiárida: Práticas relacionadas a produção agrícola / Green corn in a semiarid region: Practices related to agricultural production. *Brazilian Journal of Development*, [S. l.], v. 6, n. 6, p. 41078–41088, 2020. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n6-591>.

SIMÕES AC; ALVES GKEB; FERREIRA RLF; ARAUJO NETO SE. 2015. Qualidade da muda e produtividade de alface orgânica com condicionadores de substrato. *Horticultura Brasileira* 33: 521-526, <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-053620150000400019>.

SPEIR, T.W. Soil biochemical properties as indices of performance and sustainability of effluent irrigation systems in New Zealand: a review. *Journal of The Royal Society of New Zealand*, 32(4), 535-553, 2002, <https://doi.org/10.1080/03014223.2002.9517708>.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.M.; MURPHY, A. *Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal*, 6ª ed., 888p., 2017.

TEIXEIRA et al. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Unidade Solos. Manual de métodos de análise de solo. Paulo César Teixeira ... [et al.], editores técnicos. – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2017. ISBN 978-85-7035-771-7. 574 p.

SADAK TURHAN, A.; GÜNSAN CAN, B.; KABAY, T.; ŞENSOY, S. The Effect of Use of Microalgae [*Chlorella vulgaris* Beyerinck (Beijerinck)] in Different Fertilizer Applications on Plant Growth of Garden Rocket (*Eruca vesicaria* ssp. *sativa* Mill.). *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 323–329, 2022, <https://doi.org/10.24925/turjaf.v10i2.323-329.4909>.

UNRIC. Centro de Informação Regional das Nações Unidas para a Europa Ocidental. Guia sobre Desenvolvimento Sustentável. 17 Objetivos Para Transformar O Nosso Mundo. 2018. 38p.

UNIRIO. Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro. Coleção Didática do Canto das Flores é um projeto de Extensão do Herbário Prof. Jorge Pedro Pereira Carauta (HUNI) da UNIRIO realizado em parceria com o Centro Cultural Fundação Progresso. Disponível em: <<http://www.unirio.br/ccbs/ibio/herbariohuni/eruca-vesicaria-l-cav>>. Acesso: 16 jan. 2022.

VIEIRA, D. F. A. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Unidade Hortaliças; Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. Catálogo Brasileiro de Hortaliças: Saiba como plantar e aproveitar 50 das espécies mais comercializadas no país. Brasília, DF, 2010. 60p.

7 CONCLUSÕES GERAIS

A principal conclusão desta pesquisa é que o biofertilizante de biomassa de microalgas *Arthrospira platensis* DHR 20 (Spirulina), avaliada nesse estudo, apresenta potencial nutritivo para plantas, principalmente como fonte de nitrogênio e potássio, e como condicionador do solo. A taxa de biofixação média de CO₂ obtida pela pesquisa permite concluir que o cultivo da microalga *Arthrospira platensis* DHR 20 em ARB apresenta aptidão para a biocaptura desse GEE.

As plantas de *Eruca vesicaria* (L.) Cav. produzidas o biofertilizante, a ARB e a ureia apresentaram qualidade de desenvolvimento semelhantes segundo IQD. Entretanto, as plantas produzidas com ureia apresentaram desempenho estatisticamente superior em H, NF, DC, AF e MSPA e concentração de N e Na nas folhas em comparação com aquelas que receberam ARB e biofertilizante como fontes de nitrogênio. O biofertilizante de microalgas e a ARB proporcionaram alguns parâmetros morfológicos (H, NF, DC, AF, CR, MSPA, MFR, IQD) e químicos (K e Na nas folhas) estatisticamente semelhantes entre si. Não foram constatadas diferenças estatísticas entre os três tratamentos para os parâmetros CR, MFR e IQD. As plantas produzidas com ureia tiveram H, NF, DC, AF e MSPA e concentração de N e Na nas folhas superiores às plantas cultivadas com T2 e T3. MSR dos tratamentos T1 e T2 foi estatisticamente superior a T3. Apesar das limitações de crescimento das plantas que receberam biofertilizante em comparação com as plantas fertilizadas com ureia, o biofertilizante de microalgas é um bioproduto que, se produzido em águas residuárias, pode ser obtido com baixo custo. Após mínimo processamento, as folhas das rúculas fertirrigadas com o biofertilizante de microalgas apresentaram resultado negativo para a presença de coliformes termotolerantes.

De acordo com a RAS, o biofertilizante de microalgas e a ARB não apresentam nenhum grau de restrição para uso no solo quanto a sodicidade e grau de restrição de uso ligeiro a moderado quanto a salinidade. Porém, a segurança de sua aplicação em longo prazo não é garantida devido aos elevados níveis de Na e K encontrados no solo após receber o biofertilizante de microalgas. Portanto, o representativo aumento do Na no solo é um enorme desafio quando se busca a viabilidade e segurança do uso de ARB e biofertilizante de microalgas com características químicas semelhantes as deste estudo no solo. Mais pesquisas são necessárias em casa de vegetação e em experimentos de campo para avaliar a produtividade da rúcula e o efeito residual da aplicação do biofertilizante de microalgas no solo.

O tamanho dos agregados dos solos que receberam o biofertilizante de microalgas foi superior ao tratamento controle com ureia. A avaliação da estrutura do solo após o experimento indica que a biomassa de microalgas, bem como a ARB, pode agir como condicionador do solo, melhorando sua qualidade estrutural se comparado com solo adubado com fertilizante nitrogenado convencional (ureia).

8 RECOMENDAÇÕES DE PESQUISA

Recomenda-se a reprodução do presente estudo em casa de vegetação e em campo, com sucessivos ciclos de plantio, com aplicação de doses variadas do biofertilizante de microalgas e testando diferentes metodologias de aplicação até que se alcance produtividade semelhante ou superior à alcançada pelo fertilizante convencional ureia. Sugere-se que estudos com diferentes formas de aplicação do biofertilizante de microalgas sejam realizados como, por exemplo, utilizando biomassa de microalgas seca ou fertirrigação com o biofertilizante mais concentrado (decantado de biomassa de microalgas). A avaliação do efeito residual no solo do biofertilizante de microalgas necessita de mais estudos. O uso combinado do biofertilizante de microalgas e um fertilizante químico também parece ser uma área linha de pesquisa interessante para analisar economicamente o potencial desse bioproduto. Estabelecer métodos para estimar

a função das microalgas na mitigação das emissões de GEE agrícolas também é importante. Considerando o viés econômico de uma biorrefinaria de múltiplos produtos de microalgas em larga escala, são necessários cenários de bioeconomia com estudos mais detalhados.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A. H. M. DE, ALONSO, J. M., MELO, L. A. DE; LELES, P. S. DOS S., & SANTOS, G. R. DOS. (2019). Caracterização de biossólido e potencial de uso na produção de mudas de *Schinus terebinthifolia* Raddi. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 24(3), 591–599. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019108265>.

ÁCIEN, F. G.; GÓMEZ-SERRANO, C.; MORALES-AMARAL, M. M.; FERNÁNDEZ-SEVILLA, J. M.; MOLINA-GRIMA E. Wastewater treatment using microalgae: how realistic a contribution might it be to significant urban wastewater treatment? *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100, 9013–9022, 2016.

AGUIAR, A.T.E.; CHARLESTON GONÇALVES, C.; PATERNIANI; M.E.A.Z.P. et al. 7.^a Ed. rev. e atual. Campinas: Instituto Agronômico, 2014. 452 p. (Boletim IAC, n.º 200), ISSN 0375-1538.

ALOBWEDE, E.; LEAKE, J. R.; PANDHAL, J. Circular economy fertilization: Testing micro and macro algal species as soil improvers and nutrient sources for crop production in greenhouse and field conditions. *Geoderma*, 334, 113–123, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.049>.

ALVAREZ, A. L.; WEYERS, S. L.; GOEMANN, H. M.; PEYTON, B. M.; GARDNER, R. D. Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture. *Algal Research*, 54(102200), 2021, ISSN 2211-9264, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102200>.

ANDREOLI, C. A. Alternativas de uso de resíduos do saneamento. Rio de Janeiro: ABES. Projeto PROSAB. p. 417, 2006.

BARONE, V.; PUGLISI, I.; FRAGALÀ, F.; PIERO, A. R. L.; GIUFFRIDA, F.; BAGLIERI, A. Novel bioprocess for the cultivation of microalgae in hydroponic growing system of tomato plants. *Journal of Applied Phycology*, 31(465–470), 2019.

BARROS, A.; PEREIRA, H.; CAMPOS, J.; MARQUES, A.; VARELA, J.; SILVA J. Heterotrophy as a tool to overcome the long and costly autotrophic scale-up process for large scale production of microalgae. *Sci Rep* 9, 13935 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50206-z>.

BATISTA, A. P.; GOUVEIA, L.; BANDARRA, N. M.; FRANCO, J. M.; RAYMUNDO A. Comparison of microalgal biomass profiles as novel functional ingredient for food products. *Algal Research*, Volume 2, Issue 2, 2013, Pages 164-173, ISSN 2211-9264, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2013.01.004>.

BHALAMURUGAN, G. L.; VALERIE, O.; MARK L. Valuable bioproducts obtained from microalgal biomass and their commercial applications: a review. *Environmental Engineering Research*, 23(3), 229–241, 2018.

BECKER, E. W. Micro-algae as a source of protein, *Biotechnology Advances*, 25(2), 2007. ISSN, 207–210, 0734– 9750. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2006.11.002>.

- BELLO, A. S., SAADAOU, I., & BEN-HAMADOU, R. "Beyond the Source of Bioenergy": Microalgae in Modern Agriculture as a Biostimulant, Biofertilizer, and Anti-Abiotic Stress. *Agronomy*, 11(8), 2021.
- BHATNAGAR, A.; CHINNASAMY, S.; SINGH, M.; DAS, K.C. Renewable biomass production by mixotrophic algae in the presence of various carbon sources and wastewaters. *Applied Energy*, Volume 88, Issue 10, 2011, Pages 3425-3431, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.064>.
- BOEIRA, R. C.; LIGO, M. A. V.; DYNIA, J. F. Mineralização de nitrogênio em solo tropical tratado com lodos de esgoto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 37, n. 11, p. 1639-1647, 2002.
- BONILLA CEDREZ, C.; CHAMBERLIN, J.; GUO, Z.; HIJMANS RJ. Spatial variation in fertilizer prices in Sub-Saharan Africa. *PLoS One*, 15(1), e0227764, 2020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227764>.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Decreto Nº 4.954 de 14 de janeiro de 2004. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF (14 jan. 2004).
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Resolução Nº 375 de 29 de agosto de 2006. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF (30 ago. 2006). 2006.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa DAS Nº 07 de 12 de abril de 2016. Brasília, DF, nº.82, 02 de maio de 2006. Seção 1, p. 9. ISSN 1677-7042. 2016.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA)/Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução Normativa Nº 61, de 8 de julho de 2020. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF (15 jul. 2020).
- BRINDLEY, C.; JIMÉNEZ-RUIZ, N.; ACIÉN, F. G.; FERNÁNDEZ-SEVILLA JM. Light regime optimization in photobioreactors using a dynamic photosynthesis model. *Algal Research*, 16, 399–408.
- BULGARI, R.; COCETTA, G.; TRIVELLINI, A.; VERNIERI, P.; FERRANTE A. Biostimulants and crop responses: a review. *Biological Agriculture & Horticulture*, 31(1), 1–17, 2015.
- CARNEIRO, W. J. O.; SOUZA, E. D.; PAULINO, H. B.; SALES, L. E. O.; VILELA, L. A. F. Mineralização de Nitrogênio em Latossolos Adubados com Resíduos Orgânicos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.37, p.715-725, 2013.
- CARRIJO, O.A.; SOUZA, R.B.; MAROUELLI, W.A.; ANDRADE, R.J. Circular técnica 32. *Fertirrigação de hortaliças*. Embrapa Hortaliças. Brasília, DF, 2005. ISSN 1415-3033.13p.
- CAS, V. L. S. Mineralização do carbono e do nitrogênio no solo com o uso de lodo de esgoto e palha de aveia. 2009. 69 f. Dissertação (mestrado em Ciência do Solo) - Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, RS.
- CEPEA; CNA. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – WSALQ/USP. Confederação de Agricultura e Pecuária do Brasil. PIB do Agronegócio. 15 mar. 2022. 19p.
- CHAPIN III, F.S.; CHAPIN, M.C.; MATSON, P.A.; VITOUSEK, P. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer. 2011.

- CHO, H. U., KIM, Y. M.; PARK J.M. Enhanced microalgal biomass and lipid production from a consortium of indigenous microalgae and bacteria present in municipal wastewater under gradually mixotrophic culture conditions. *Bioresource Technology*, 228, 290–297, 2017.
- COELHO, E.F.; COSTA, E.L.; BORGES, A.L.; NETO, T.M.A.; PINTO, J.M. *Fertirrigação. Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v.31, n.259, p.58-70, 2010.
- COLLA, G.; ROUPHAEL Y. Microalgae: new Source of Plant Biostimulants. *Agronomy*, 10(9), 1–4, 2020.
- COPPENS, J.; GRUNERT, O.; VAN DEN HENDE, S.; VANHOUTTE, I., BOON, N.; HAESAERT, G.; GELDER LD. The use of microalgae as a high-value organic slow-release fertilizer results in tomatoes with increased carotenoid and sugar levels. *J Appl Phycol*, 28, 2367–2377, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0775-2>.
- CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, v. 19, n. 2, p. 292–305, maio 2009.
- COSTA, J. A. V.; FREITAS, B. C. B.; CRUZ, C. G.; SILVEIRA, J.; MORAIS, M. G. Potential of microalgae as biopesticides to contribute to sustainable agriculture and environmental development, *Journal of Environmental Science and Health, Part B. Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 54(5), 2019. <https://doi.org/10.1080/03601234.2019.1571366>.
- COSTA, O. Y. A.; RAAIJMAKERS, J. M.; KURAMAE, E. E. Microbial extracellular polymeric substances: Ecological function and impact on soil aggregation. *Frontiers in Microbiology Frontiers Media S.A.*, 23 jul. 2018. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01636>.
- DE MEDEIROS, V. P. B.; PIMENTEL, T. C.; VARANDAS, R. C. R.; SANTOS, S. A.; PEDROSA, G. T. S.; SASSI, C. F. C.; CONCEIÇÃO, M. M.; MAGNANI, M. Exploiting the use of agroindustrial residues from fruit and vegetables as alternative microalgae culture médium. *Food Research International*, Volume 137, 2020, 109722, ISSN 0963-9969, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109722>.
- DE MENDONÇA, H.V. Tratamento e valorização de efluentes de bovinocultura por processos biológicos. Programa De Pós-Graduação em Ecologia Aplicada ao Manejo e Conservação de Recursos Naturais – Tese (Doutorado). 2017. 126p.
- DE MENDONÇA, H. V., MARTINS, C. E., ROCHA, W. S. D., BORGES, C. A. V., OMETTO, J. P. H. B., OTENIO, M. H. Biofertilizer Replace Urea as a Source of Nitrogen for Sugarcane Production. *Water, Air, and Soil Pollution*, 229, 216, 2018a. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3874-2>.
- DE MENDONÇA, H.V.; OMETTO, J.P.H.B.; OTENIO, M.H.; MARQUES, I.P.R.; REIS, A.J.D.R. Microalgae-mediated bioremediation and valorization of cattle wastewater previously digested in a hybrid anaerobic reactor using a photobioreactor: Comparison between batch and continuous operation, *Science of The Total Environment*, Volume 633, 2018b, Pages 1-11, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.157>.
- DE MENDONÇA, H. V.; OTENIO, M. H.; MARCHÃO, L.; LOMEU, A.; DE SOUZA, D. S.; REIS, A. Biofuel recovery from microalgae biomass grown in dairy wastewater treated with activated sludge: The next step in sustainable production, *Science of The Total Environment*, Volume 824, 2022. ISSN, 153838, 0048–9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153838>.

- DE MORAIS, M. G.; DE MORAIS, E. G.; DUARTE, J. H.; DEAMICI, K. M.; MITCHELL, B. G.; COSTA J.A.B. Biological CO₂ mitigation by microalgae: technological trends, future prospects and challenges. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 35, 78, 2019.
- DE SOUZA, D. S.; VALADÃO, R. C.; DE SOUZA, E. R. P.; BARBOSA, M. I. M. J; DE MENDONÇA H.V. Enhanced *Arthrospira platensis* Biomass Production Combined with Anaerobic Cattle Wastewater Bioremediation. *Bioenergy Research*, 15, 412–425, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10258-4>.
- DE SOUZA, M.P.; HOELTZ, M.; GRESSLER, P.D.; BENITEZ, L.B.; SCHNEIDER, R.C.S. Potential of Microalgal Bioproducts: General Perspectives and Main Challenges. *Waste Biomass Valor* 10, 2139–2156, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0253-6>
- DI DOMENICO ZIERO, H. D. D.; BULLER, L. S.; MUDHOO, A.; AMPESE, L. C.; MUSSATTO, S. I.; CARNEIRO, T. F. An overview of subcritical and supercritical water treatment of different biomasses for protein and amino acids production and recovery. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104406, ISSN 2213-3437, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104406>.
- DINESHKUMAR, R.; SUBRAMANIAN, J.; GOPALSAMY, J.; JAYASINGAM, P.; ARUMUGAM, A.; KANNADASAN, S.; SAMPATHKUMAR P. The Impact of Using Microalgae as Biofertilizer in Maize (*Zea mays* L). *Waste Biomass Valor*, 10, 1101–1110, 2019, <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0123-7>.
- DOLGANYUK, V.; BELOVA, D.; BABICH, O.; PROSEKOV, A.; IVANOVA, S.; KATSEROV, D.; PATYUKOV, N.; SUKHIKH, S. Microalgae: A Promising Source of Valuable Bioproducts. *Biomolecules*, 10(8), 1153, 2020. <https://doi.org/10.3390/biom10081153>.
- DOS SANTOS, M.G.B.; DUARTE, R.L.; MACIEL, A.M.; ABREU, M.; REIS, A.; DE MENDONÇA, H.V. Microalgae Biomass Production for Biofuels in Brazilian Scenario: A Critical Review. *Bioenerg. Res.* 14, 23–42 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10180-1>.
- EGLE, L.; RECHBERGER, H.; ZESSNER, M. Overview and description of technologies for recovering phosphorus from municipal wastewater, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 105, Part B, 2015, Pages 325-346, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.016>.
- EL ARROUSSI, H., BENHIMA, R., ELBAOUCHI, A., SIJILMASSI, B., EL MERNISSI, N., AAFSAR, A., MEFTAH-KADMIRI, I.; BENDAOU, N.; SMOUNI A. *Dunaliella salina* exopolysaccharides: a promising biostimulant for salt stress tolerance in tomato (*Solanum lycopersicum*). *Journal of Applied Phycology*, 30, 2929–2941, 2018.
- EL-NAGGAR, N. E. A.; HUSSEIN, M. H.; SHAABAN-DESSUUKI, S. A.; DALAL SR. Production, extraction and characterization of *Chlorella vulgaris* soluble polysaccharides and their applications in AgNPs biosynthesis and biostimulation of plant growth. *Scientific Reports*, 10, 1–19, 2020.
- FARID, R.; MUTALE-JOAN, C.; REDOUANE, B.; MERNISSI NAJIB, E.; ABDERAHIME, A.; LAILA, S.; AR-ROUSSEHICHAM, E. Effect of microalgae polysaccharides on biochemical and metabolomics pathways related to plant defense in *Solanum lycopersicum*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 188, 225–240, 2019.

- FERNÁNDEZ, F.G.A.; REIS, A.; WIJFFELS, R.H.; BARBOSA, M.; VERDELHO, V.; LLAMAS, B. The role of microalgae in the bioeconomy, *New Biotechnology*, Volume 61, 2021, Pages 99-107, ISSN 1871-6784, <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.11.011>.
- FRANCO, A. L. C.; LÔBO, I. P., DA; CRUZ RS.; TEIXEIRA, C. M. L. L.; ALMEIDA NETO, J. A. D. E.; MENEZES, R.S. Biodiesel de microalgas: avanços e desafios. *Química Nova*, 36(3), 437–448, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000300015>.
- FERREIRA, A., MARQUES, P., RIBEIRO, B., ASSEMANY, P., DE MENDONÇA, H. V., BARATA, A., OLIVEIRA, A. C., REIS, A.; PINHEIRO, H. M.; GOUVEIA L. Combining biotechnology with circular bioeconomy: from poultry, swine, cattle, brewery, dairy and urban wastewaters to biohydrogen. *Environmental Research*, 164, 32–38, 2018.
- FERREIRA, A.; MELKONYAN, L.; CARAPINHA, S.; RIBEIRO, B.; FIGUEIREDO, D.; AVETISOVA, G.; GOUVEIA, L. Biostimulant and biopesticide potential of microalgae growing in piggery wastewater. *Environmental Advances*, Volume 4, 2021, 100062, ISSN 2666-7657, <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100062>.
- FIELDS, F. J.; LEJZEROWICZ, F.; SCHROEDER, D.; NGOI, S. M.; TRAN, M.; MCDONALD, D.; JIANG, L.; CHANG, J. T.; KNIGHT, R.; MAYFIELD, S. Effects of the microalgae *Chlamydomonas* on gastrointestinal health. *Journal of Functional Foods*, Volume 65, 2020, 103738, ISSN 1756-4646, <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103738>.
- FIERER, N., JACKSON, R.B. The diversity and biogeography of soil bacterial communities. *Proceedings of National Academy of Science. USA* v. 103, p. 626-631, 2006.
- GARCIA-GONZALEZ, J.; SOMMERFELD, M. Biofertilizer and biostimulant properties of the microalga *Acutodesmus dimorphus*. *Journal of Applied Phycology*, 28, 1051–1061, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0625-2>.
- GIACOMINI, S. J.; AITA, C.; HUBNER, A.P.; LUNKES, A.; GUIDINI, E.; AMARAL, E.B. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 38, p. 1097-1104, set. 2003.
- GONÇALVES, A. L.; PIRES, J. C. M.; SIMÕES M. A review on the use of microalgal consortia for wastewater treatment. *Algal Research*, 24(part B), 403–415, 2017, ISSN 2211-9264, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.11.008>.
- GONG, Y.; JIANG, M. Biodiesel production with microalgae as feedstock: from strains to biodiesel. *Biotechnol Lett*, 33, 1269–1284, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10529-011-0574-z>.
- HUSSAIN, F.; SHAH, S.Z.; AHMAD, H.; ABUBSHAIT, S.A.; ABUBSHAIT, H.A.; LAREF, A.; MANIKANDAN, A.; KUSUMA, H.S.; IQBAL, M. Microalgae an ecofriendly and sustainable wastewater treatment option: Biomass application in biofuel and bio-fertilizer production. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 137, 2021, 110603, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110603>.
- HUTCHISON, C. M. W.; WALWORTH, J. L. Evaluating the effects of gross nitrogen mineralization, immobilization, and nitrification on nitrogen fertilizer availability in soil experimentally contaminated with diesel. *Biodegradation*, v. 18, p. 133-144, 2007.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário 2017. Resultados Definitivos. Censo agropecuário, Rio de Janeiro, v. 8, p.1-105, 2019. ISSN 0103-6157.
- JIANG, L.; LUO, S.; FAN, X.; YANG, Z.; GUO, R. Biomass and lipid production of marine microalgae using municipal wastewater and high concentration of CO₂. *Applied Energy*, 88(10), 3336–3341. ISSN 0306-2619, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.043>.

- KAPOORE, R. V.; WOOD, E. E.; LLEWELLYN, C. A. Algae biostimulants: A critical look at microalgal biostimulants for sustainable agricultural practices. *Biotechnology Advances*, 49(2021), 107754, ISSN 0734-9750, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107754>.
- KERSHAW, E. H.; HARTLEY, S.; MCLEOD, C. Polson P. The Sustainable Path to a Circular Bioeconomy. *Trends in Biotechnology*, 39(6), 542–545, 2020.
- KIM, M. J., SHIM, C. K., KIM, Y. K., KO, B. G., PARK, J. H., HWANG, S. G.; KIM, B. H. Effect of biostimulator *Chlorella fusca* on improving growth and qualities of Chinese chives and spinach in organic farm. *Plant Pathology Journal*, 34, 567–574, 2018, <https://doi.org/10.5423/PPJ.FT.11.2018.0254>.
- KINPARA, D.I. A importância estratégica do potássio para o Brasil. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2003. ISSN 1517-5111. 27p.
- LAL, R. Ed. 2006: *Encyclopedia of Soil Science*, 2nd ed, Taylor and Francis Group, LLC, New York, NY. Disponível em: <http://scholar.google.com/scholar_lookup?hl=en&publication_year=2006&author=R+Lal&title=Encyclopedia+of+Soil+Science>. Acesso em: 09 dez. 2022.
- LEITE, L. F. C.; MENDONÇA, E. S. Modelo Century na dinâmica da matéria orgânica do solo: equações e pressupostos. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 33, p. 679-686, jul./ago. 2003.
- LORENTZ, J. F., CALIJURI, M. L., ASSEMANY, P. P., ALVES, W. S.; PEREIRA, O. G. Microalgal biomass as a biofertilizer for pasture cultivation: Plant productivity and chemical composition. *Journal of Cleaner Production*, 276, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124130>.
- MACHADO, V. J.; SOUZA, C. H. E.; ANDRADE, B. B.; LANA, R. M. Q. Curvas de Disponibilidade de Fósforo em Solos com Diferentes Texturas Após Aplicação de Doses Crescentes de Fosfato Monoamônico. *Bioscience Journal*. Uberlândia, v.27, n.1, p.70-76, 2011.
- MAGALHÃES, A.C.M. Adubação orgânica com base na taxa de mineralização de nutrientes do composto orgânico. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Fortaleza, 2018. 81f.
- MAGALHÃES, I. B.; FERREIRA, J.; DE SIQUEIRA CASTRO, J.; DE ASSIS, L. R.; CALIJURI, M. L. Technologies for improving microalgae biomass production coupled to effluent treatment: A life cycle approach. *Algal Research*, 57(102346), 2021. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102346>.
- MANNING, D.A.C. How will minerals feed the world in 2050?, *Proceedings of the Geologists' Association*, Volume 126, Issue 1, 2015, Pages 14-17, ISSN 0016-7878, <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2014.12.005>.
- MARKOU, G.; ICONOMOU, D.; MUYLAERT, K. Applying raw poultry litter leachate for the cultivation of *Arthrospira platensis* and *Chlorella vulgaris*. *Algal Research*, v. 13, p. 79–84, 2016.
- MATOS, A.T.; MATOS, M.P. Disposição de águas residuárias no solo e em sistemas alagados construídos. Viçosa, MG: Ed. UFJ, 2017. 371p.
- MATOS, J., CARDOSO, C., BANDARRA, N. M., AFONSO, C. Microalgae as healthy ingredients for functional food: A review. *Food & Function*, 8(8), 2017. <https://doi.org/10.1039/c7fo00409e>.

- MENEZES, R.S.C. & SALCEDO, I.H. Mineralização de N após incorporação de adubos orgânicos em um Neossolo Regolítico cultivado com milho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, p. 361-367, 2007.
- MEDEIROS, V. P. B.; PIMENTEL, T. C.; VARANDAS, R. C. R.; SANTOS, S. A.; PEDROSA, G. T. S.; SASSI, C. F. C.; CONCEIÇÃO, M. M.; MAGNANI, M. Exploiting the use of agroindustrial residues from fruit and vegetables as alternative microalgae culture médium. *Food Research International*, Volume 137, 2020, 109722, ISSN 0963-9969, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109722>.
- MENDES JUNIOR, A. P.; BUENO, O. C. Participação da energia fóssil na produção dos fertilizantes industriais nitrogenados com ênfase na ureia. *Energia Na Agricultura*, 30(442–447), 2015.
- MICHALAK, I.; CHOJNACKA, K. Algae as production systems of bioactive compounds. *Engineering in Life Sciences*, 15, 160–76, 2015.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. *Microbiologia e Bioquímica do solo*. Lavras: UFLA, 2006, 729 p.
- MULBRY, W., KONDRAD, S., PIZARRO, C., & KEBEDE-WESTHEAD, E. Treatment of dairy manure effluent using freshwater algae: Algal productivity and recovery of manure nutrients using pilot-scale algal turf scrubbers, *Bioresource Technology*, 99(17), 2008. ISSN, 8137–8142, 0960–8524. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.03.073>.
- NAGARAJAN, D., LEE, D.-J., CHEN, C.-Y., & CHANG, J.-S. Resource recovery from wastewaters using microalgae-based approaches: A circular bioeconomy perspective. *Bioresource Technology*, 122817, 2020.
- NEDER, R., RABÊLO, O. DA S., HONDA, D. P., & DE SOUZA, P. A. R. Relações entre Inovação e Sustentabilidade: Termos e Tendências na Produção Científica Mundial. *Gestão & Regionalidade*, 35(104), 2019. <https://doi.org/10.13037/gr.vol35n104.5304>.
- NISHA, R., KIRAN, B., KAUSHIK, A., & KAUSHIK, C. P. Bioremediation of salt affected soils using cyanobacteria in terms of physical structure, nutrient status and microbial activity. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15, 571–580, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1419-7>.
- OLIVEIRA, E.P. et al. Mineralização de nitrogênio em Latossolo Amarelo adubado com composto orgânico alternativo. *Agropecuária Científica no Semiárido*, v. 14, n. 4, 2018. <http://dx.doi.org/10.30969/acsa.v14i4.1010>.
- ONI, B. A.; OZIEGDE, O.; OLAWOLE, O. O. Significance of biochar application to the environment and economy. *Annals of Agricultural Sciences*, 64, 222–236, 2019.
- PAULA, J.R. Mineralização de resíduos orgânicos no solo em condição de campo. Pós-Graduação em Engenharia Agrícola - Tese (Doutorado). Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2012. 90p.
- PATEL, A.; MATSAKAS, L.; ROVA, U.; CHRISTAKOPOULOS P. A perspective on biotechnological applications of thermophilic microalgae and cyanobacteria. *Bioresource Technology*, 278, 424–34.
- PAULA, J. R.; MATOS, A.T.; MATOS, M.P.; PEREIRA, M.S.; ANDRADE, M.S.; ANDRADE, C.A. Mineralização do carbono e nitrogênio de resíduos aplicados ao solo em campo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37: 1729-1741, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000600029>.

- PITTA, C.S.R.; ADAMI, P.F.; PELISSARI, A.; ASSAMANN, T.S.; FRANCHIN, M.F.; CASSOL, L.C. & SARTOR, L.R. Year-round poultry litter decomposition and N, P, K and Ca release. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.1043-1053, 2012.
- POSADAS, E.; MORALES, M.; DEL, M.; GOMEZ, C.; ACIÉN, F. G.; MUÑOZ, R. Influence of pH and CO₂ source on the performance of microalgae-based secondary domestic wastewater treatment in outdoors pilot raceways. *Chemical Engineering Journal*, 265, 239–248, 2015.
- PRIYADARSHANI, I., RATH, B., & THAJUDDIN, N. Influence of aeration and light on biomass production and protein content of four species of marine cyanobacteria. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3(12), 173–182.
- PUGLISI I.; LA BELLA, E.; ROVETTO, E.I.; LO PIERO, A.R.; BAGLIERI, A. Biostimulant Effect and Biochemical Response in Lettuce Seedlings Treated with *A Scenedesmus quadricauda* Extract. *Plants (Basel)*. 2020 Jan 18;9(1):123. <https://doi.org/10.3390/plants9010123>.
- QIE, F., ZHU, J., RONG, J., ZONG, B. Biological removal of nitrogen oxides by microalgae, a promising strategy from nitrogen oxides to protein production. *Bioresource Technology*, 292, 122037, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122037>.
- RAWAT, I.; KUMAR, R. R.; MUTANDA, T.; BUX, F. Dual role of microalgae: phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Renew Energy*, 88, 3411–3424, 2011.
- REN, Q.; CHEN, X.; YUMMINAGA, Y.; WANG, N.; YAN, W.; LI, Y.; LIU, L.; SHI, J. Effect of operating conditions on the performance of multichannel ceramic ultrafiltration membranes for cattle wastewater treatment, *Journal of Water Process Engineering*, Volume 41, 2021, 102102, ISSN 2214-7144, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102102>.
- RENUKA, N.; GULDHE, A.; PRASANNA, R.; SINGH, P.; BUX, F. Microalgae as multi-functional options in modern agriculture: current trends, prospects and challenges. *Biotechnology Advances*, 36(4), 1255–1273, 2018.
- RENUKA, N.; PRASANNA, R.; SOOD, A. et al. Exploring the efficacy of wastewater-grown microalgal biomass as a biofertilizer for wheat. *Environ Sci Pollut Res* 23, 6608–6620, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5884-6>.
- ROCHA, D.T.; CARVALHO, G.R.; RESENDE, J.C. Cadeia produtiva do leite no Brasil: produção primária. *Embrapa, Circ. Técn.* 123. ISSN 1678–037X. 16p, 2020.
- SHARMA, G. K.; KHAN, S. A.; SHRIVASTAVA, M.; BHATTACHARYYA, R.; SHARMA, A.; GUPTA, D. K.; GUPTA, N. Circular economy fertilization: Phycoremediated algal biomass as biofertilizers for sustainable crop production. *Journal of Environmental Management*, 287, 112295, 2021.
- SHANTHI, G.; PREMALATHA, M.; ANANTHARAMAN, N. Potential utilization of fish waste for the sustainable production of microalgae rich in renewable protein and phycocyanin-*Arthrospira platensis/Spirulina*. *Journal of Cleaner Production*, 294, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126106>.
- SCHMITZ, R.; MAGRO, C.; COLLA, L. Aplicações Ambientais de Microalgas. *Revista CIATEC-UPF*, 4(1), 48–60, 2012. <https://doi.org/10.5335/ciatec.v4i1.2393>.
- SINGH, J. S., KUMAR, A., RAI, A. N., & SINGH, D. P. Cyanobacteria: a precious bio-resource in agriculture, ecosystem, and environmental sustainability. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1–19, 2016.

- SIPERT, S., COHIM, E. & DO NASCIMENTO, F.R.A. Identification and quantification of main anthropogenic stocks and flows of potassium in Brazil. *Environ Sci Pollut Res* 27, 32579–32593, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09526-1>.
- SOLOVCHENKO, A.; VERSCHOOR, A. M.; JABLONOWSKI, N. D.; NEDBAL, L. Phosphorus from wastewater to crops: an alternative path involving microalgae. *Biotechnology Advance*, 34, 550–564, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.01.002>.
- SOUTO, P. C.; SOUTO, J.S.; SANTOS, R.V.; ARAUJO, G.T.; SOUTO, L.S. Decomposição de esterco disposto em diferentes profundidades em área degradada no semi-árido da Paraíba. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v. 29, p. 125-130, jan./fev. 2005.
- SPROLES, A. E.; FIELDS, F. J.; SMALLEY, T. N.; LE, C. H.; BADARY, A.; MAYFIELD, S. P. Recent advancements in the genetic engineering of microalgae. *Algal Research*, 53, 2021, 102158. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102158>.
- STEINER, C.; GARCIA, M.; ZECH, W. Effects of Charcoal as Slow Release Nutrient Carrier on N-P-K Dynamics and Soil Microbial Population: Pot Experiments with Ferralsol Substrate, 2009. In: Woods, W.I., Teixeira, W.G., Lehmann, J., Steiner, C., WinklerPrins, A., Rebellato, L. (eds) *Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9031-8_17
- STEWART, W. M.; DIBB, D. W.; JOHNSTON, A. E.; SMYTH, T. J. The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. *Agronomy Journal*. v. 97, n. 1, p. 1-6, 2005.
- STIRK, W. A.; ÖRDÖG, V.; VAN STADEN, J. J.; AGER, K. Cytokinin- and auxin-like activity in Cyanophyta and microalgae. *Journal of Applied Phycology*, 14, 215–221, 2022.
- SUN, N.; WANG, Y.; LI, Y. T.; HUANG, J. C.; CHEN, F. Sugar-based growth, astaxanthin accumulation and carotenogenic transcription of heterotrophic *Chlorella zofingiensis* (Chlorophyta). *Process Biochem.*, 43, 1288–1292. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2008.07.014>.
- TRASAR-CEPEDA, C.; GIL-SOTRES, F.; LEIROS, M.C. Thermodynamic parameters of enzymes in grassland soils from Galicia, NW Spain. *Soil Biology Biochemical*, v. 39, p. 311–319, 2007.
- UNIRIO. Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro. Coleção Didática do Canto das Flores é um projeto de Extensão do Herbário Prof. Jorge Pedro Pereira Carauta (HUNI) da UNIRIO realizado em parceria com o Centro Cultural Fundação Progresso. Disponível em: <<http://www.unirio.br/ccbs/ibio/herbariohuni/eruca-vesicaria-l-cav>>. Acesso: 16 jan. 2022.
- USGS. United States Geological Survey. Mineral commodity summaries 2022: U.S. Geological Survey, 202 p., 2022, <https://doi.org/10.3133/mcs2022>.
- VIEIRA, D. F. A. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Unidade Hortaliças; Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. *Catálogo Brasileiro de Hortaliças: Saiba como plantar e aproveitar 50 das espécies mais comercializadas no país*. Brasília, DF, 2010. 60p.
- WANG, Y., LI, Y. Q., LV, K., CHENG, J. J., CHEN, X. L., GE, Y., YU, X. Y. Soil microalgae modulate grain arsenic accumulation by reducing dimethylarsinic acid and enhancing nutrient uptake in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant and Soil* 430, 99–111 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3719-1>
- WIJFFELS, R. H.; BARBOSA, M. J. An Outlook on Microalgal Biofuels. *Science*, 329(5993), 796–799, 2010. <https://doi.org/10.1126/science.1189003>.

WISNIEWSKI, C.; HOLTZ, G. P. Decomposição da palhada e liberação de nitrogênio e fósforo numa rotação aveia-soja sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 32, p. 1191-1197, nov, 1997.

ZHAI, J.; LI, X.; LI, W.; HASIBUR RAHAMAN, MD.; ZHAO, Y.; WEI, B.; WEI, H. Optimization of biomass production and nutrients removal by *Spirulina platensis* from municipal wastewater, *Ecological Engineering*, Volume 108, Part A, 2017, Pages 83-92, ISSN 0925-8574, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.07.023>.

ZHANG, Y., XIAO, Z., AGER, E., KONG, L., TAN, L. Nutritional quality and health benefits of microgreens, a crop of modern agriculture. *Journal of Future Foods*, 1(1), 58–66, ISSN 2772-5669. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2021.07.001>.

ZWETSLOOT, M. J.; LEHMANN, J.; SOLOMON, D. Recycling slaughterhouse waste into fertilizer: how do pyrolysis temperature and biomass additions affect phosphorus availability and chemistry? *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 95, n. 2, p. 281-288, 2015.